

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta chemická

DIZERTAČNÍ PRÁCE

Brno, 2018

Ing. Pavel Florián



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA CHEMICKÁ**

FACULTY OF CHEMISTRY

**ÚSTAV FYZIKÁLNÍ A SPOTŘEBNÍ CHEMIE**

INSTITUTE OF PHYSICAL AND APPLIED CHEMISTRY

**STUDIUM ELEKTRICKÝCH A DIELEKTRICKÝCH  
VLASTNOSTÍ ALKALICKY AKTIVOVANÝCH  
ALUMINOSILIKÁTŮ SE ZVÝŠENOU ELEKTRICKOU  
VODIVOSTÍ**

STUDY OF ELECTRIC AND DIELECTRIC PROPERTIES OF ALKALI-ACTIVATED ALUMINOSILICATE WITH  
INCREASED ELECTRICAL CONDUCTIVITY

**DIZERTAČNÍ PRÁCE**

DOCTORAL THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Ing. Pavel Florián

**ŠKOLITEL**

SUPERVISOR

prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc.

**BRNO 2018**

## Zadání dizertační práce

Ústav: Ústav fyzikální a spotřební chemie  
Student: **Ing. Pavel Florián**  
Studijní program: Chemie, technologie a vlastnosti materiálů  
Studijní obor: Chemie, technologie a vlastnosti materiálů  
Vedoucí práce: **prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc.**  
Akademický rok: 2017/18

### Název dizertační práce:

Studium elektrických a dielektrických vlastností alkalicky aktivovaných aluminosilikátů se zvýšenou elektrickou vodivostí

### Zadání dizertační práce:

- rešerše na téma alkalicky aktivovaných aluminosilikátů (AAA) a jejich možného využití, souvislost mezi vlastnostmi, strukturou a složením AAA
- měření a vyhodnocení elektrických, dielektrických a tepelných vlastností vzorků AAA se zvýšenou elektrickou vodivostí
- studium vlivu elektrického pole kolmého na směr elektrického proudu
- studium impedančních spekter vzorků AAA se zvýšenou elektrickou vodivostí a jejich použití pro modelování ekvivalentních obvodů
- hledání souvislostí mezi elektrickými, dielektrickými a tepelnými vlastnostmi a složením měřených vzorků AAA
- diskuse výsledků měření volt–ampérových charakteristik, impedančních spekter a měření tepelných vlastností vzorků AAA se zvýšenou elektrickou vodivostí

**Termín odevzdání dizertační práce: 31.8.2018**

Ing. Pavel Florián  
student(ka)

prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc.  
vedoucí práce

prof. Ing. Miloslav Pekař, CSc.  
vedoucí ústavu

V Brně dne 1.1.2018

prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.  
děkan

## **ABSTRAKT**

Tato dizertační práce je zaměřena na studium elektrických, dielektrických a tepelných vlastností kompozitních materiálů na bázi alkalicky aktivovaných aluminosilikátů s příměsemi různých uhlíkových částic. Tyto materiály připravené z alkalicky aktivované vysokopeční strusky, křemenného písku, sodného vodního skla jako alkalického aktivátoru, vody, dispergátoru a malého množství elektricky vodivé uhlíkové příměsi (uhlíkových sazí, grafitového prášku, uhlíkových vláken nebo uhlíkových nanotrubiček) ke zlepšení elektrických vlastností se mohou používat například ke konstrukci sněh rozpouštějících, odmrazujících a sebe-monitorujících systémů. Ke stanovení elektrických a dielektrických vlastností vzorků těchto materiálů byly využity jejich volt-ampérové charakteristiky a impedanční spektra. Při analýze impedančních spekter byly využity ekvivalentní (náhradní) elektrické obvody. Tepelné vlastnosti byly stanoveny pomocí tranzientní schodové metody.

## **ABSTRACT**

This dissertation deals with the study of electric, dielectric and thermal properties of composite structures on the base of alkali-activated aluminosilicates with admixtures of various carbon particles. These materials fabricated from alkali-activated blast furnace slag, quartz sand, sodium water glass as alkali activator, water, dispersant and small amount of carbon admixture (carbon black, graphite powder, carbon fibers or carbon nanotubes) to increase electric conductivity may be used for example to construction of snow-melting, deicing and self-monitoring systems. Their current-voltage characteristics and impedance spectra were used for determination of electric and dielectric properties of these structures. The equivalent circuits were used for evaluation of impedance spectra. Thermal properties were determined with using of transient step wise method.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Alkalicky aktivované aluminosilikátové kompozity, uhlíkové přídavky, elektricky vodivé betony, elektrické a dielektrické vlastnosti, tepelné vlastnosti, volt-ampérové charakteristiky, impedanční spektroskopie, tranzientní metody

## **KEYWORDS**

Alkali-activated aluminosilicate composites, carbon admixtures, electrically conductive concretes, electric and dielectric properties, thermal properties, current-voltage characteristics, impedance spectroscopy, transient methods



FLORIÁN, P. *Studium elektrických a dielektrických vlastností alkalicky aktivovaných aluminosilikátů se zvýšenou elektrickou vodivostí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2018. 118 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc..

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem dizertační práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Dizertační práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího práce a děkana FCH VUT.

.....  
Podpis studenta

### **Poděkování:**

*Děkuji vedoucímu dizertační práce prof. Ing. Oldřichu Zmeškalovi, CSc. za jeho vedení, odborné rady a trpělivost při sepisování této práce a také za vedení v průběhu mého doktorského studia. Dále děkuji svým kolegům za poskytnutí jejich cenných znalostí a zkušeností.*

# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>8</b>
2.1	ALKALICKY AKTIVOVANÉ ALUMINOSILIKÁTY .....	8
2.2	VYUŽITÍ ALKALICKY AKTIVOVANÝCH ALUMINOSILIKÁTŮ .....	9
2.3	STRUKTURA ALKALICKY AKTIVOVANÝCH ALUMINOSILIKÁTŮ.....	10
2.3.1	Závislost na složení .....	10
2.3.2	Změny způsobené teplotou a jejich vliv na vlastnosti.....	11
2.3.3	Strukturní parametry .....	11
2.3.4	Vliv strukturních parametrů na vlastnosti .....	12
2.3.5	Modelování vlastností .....	13
2.4	ELEKTRICKY VODIVÉ PŘÍMĚSI DO BETONOVÝCH MATRIC A JEJICH VYUŽITÍ.....	15
2.4.1	Struktura elektricky vodivého betonu .....	16
2.4.2	Rozptýl příměsí v elektricky vodivém betonu .....	16
2.4.3	Elektrický proud v elektricky vodivých betonech.....	17
2.4.4	Uhlíkové saze .....	21
2.4.5	Grafitový prášek .....	21
2.4.6	Uhlíková vlákna .....	22
2.4.7	Uhlíková nanovlákna.....	23
2.4.8	Uhlíkové nanotrubičky .....	23
2.4.9	Ocelová vlákna .....	24
2.4.10	Niklový prášek .....	25
2.4.11	Ocelářská struska.....	26
2.5	ELEKTRICKY NEVODIVÉ PŘÍMĚSI DO BETONOVÝCH MATRIC A JEJICH VYUŽITÍ.....	26
2.5.1	Příměsí k opravě trhlin .....	26
2.5.2	Materiály s fázovou přeměnou – PCM.....	27
2.6	VYHODNOCENÍ DIELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ .....	27
2.7	VYHODNOCENÍ TEPELNÝCH VLASTNOSTÍ .....	30
2.8	VYHODNOCENÍ STRUKTURY ELEKTRICKY VODIVÝCH BETONŮ.....	31
<b>3</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>32</b>
3.1	PŘÍPRAVA VZORKŮ.....	32
3.1.1	Obecný postup pro referenční vzorek .....	32
3.1.2	Vzorky s uhlíkovými sazemi.....	34
3.1.3	Vzorky s grafitovým práškem .....	38
3.1.4	Vzorky s uhlíkovými vlákny .....	40
3.1.5	Vzorky s CNT .....	43
3.1.6	Kontaktování vzorků .....	47
3.2	VLASTNOSTI ELEKTRICKY VODIVÝCH BETONŮ S UHLÍKOVÝMI PŘÍMĚSEMI.....	47
3.2.1	Vzorky s uhlíkovými sazemi, grafitovým práškem a uhlíkovými vlákny ...	47
3.2.2	Vzorky s grafitovým práškem, uhlíkovými vlákny a CNT .....	48
3.3	CHARAKTERIZACE VZORKŮ.....	49
3.3.1	Uspořádání experimentu .....	49
3.3.2	Měření elektrických vlastností .....	50
3.3.3	Měření dielektrických vlastností .....	50
3.3.4	Měření tepelných vlastností.....	50
3.3.5	Optická mikroskopie .....	51

<b>4</b>	<b>VÝSLEDKY A DISKUZE .....</b>	<b>52</b>
4.1	ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI.....	53
4.1.1	Uhlíkové saze .....	53
4.1.2	Grafitový prášek .....	55
4.1.3	Uhlíková vlákna .....	57
4.1.4	Uhlíkové nanotrubičky .....	59
4.1.5	Souhrn výsledků .....	61
4.2	DIELEKTRICKÉ VLASTNOSTI .....	62
4.2.1	Uhlíkové saze .....	62
4.2.2	Grafitový prášek .....	65
4.2.3	Uhlíková vlákna .....	66
4.2.4	Uhlíkové nanotrubičky .....	69
4.2.5	Souhrn výsledků .....	70
4.3	TEPELNÉ VLASTNOSTI .....	75
4.3.1	Uhlíkové saze .....	75
4.3.2	Grafitový prášek .....	79
4.3.3	Uhlíková vlákna .....	81
4.3.4	Uhlíkové nanotrubičky .....	82
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>83</b>
<b>6</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>85</b>
<b>7</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>90</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM PUBLIKACÍ A AKTIVIT V PRŮBĚHU DOKTORSKÉHO STUDIA ..</b>	<b>93</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>94</b>
<b>10</b>	<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>1</b>

# 1 ÚVOD

Alkalická aktivace aluminosilikátů (hlinitokřemičitanů) je chemická reakce používaná například k získávání pojiv s vlastnostmi podobnými, jako mají tradiční pojiva na bázi portlandského cementu (PC). Alkalicky aktivované aluminosilikáty (alkali-activated aluminosilicates, AAA) jsou proto současně intenzivně zkoumány z hlediska jejich využití jako pojiv ve stavebnictví namísto pojiv na bázi standardně používaného PC [1]. Jejich použitím je dosahováno různých výhod oproti použití PC, například vysoké životnosti, nízké výrobní ceny a nízké zátěže pro životní prostředí. Tyto materiály se vyrábějí alkalickou aktivací různých průmyslových odpadů, které je vhodné recyklovat. Pojiva na bázi AAA obsahují při použití sodného alkalického aktivátoru polymerní síť složenou z  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  a vody zvanou N-A-S-H gel, která zajišťuje jejich mechanickou pevnost a odolnost (při použití draselného aktivátoru je  $\text{Na}_2\text{O}$  nahrazen  $\text{K}_2\text{O}$ ).

V současnosti jsou zkoumány také elektricky vodivé betony (electrically conductive concretes – ECC) na bázi AAA, což jsou kompozity AAA s různými příměsemi, které slouží ke zvýšení jejich elektrické vodivosti [2]. ECC lze využít například jako sebe-monitorující senzory trhlin, poškození, tlaku nebo vlhkosti, dále k elektrickému vytápění nebo k elektromagnetickému stínění, katodové ochraně před korozí kovových výztuží betonů, k uzemnění a ochraně proti bleskům. Jako příměsi ke zvýšení elektrické vodivosti mohou být použity například: grafitový prášek (graphite powder, GP), uhlíková vlákna (carbon fibers, CF), uhlíkové saze (carbon black, CB), niklový prášek (nickel powder, NP), ocelová vlákna (steel fibers, SF), ve speciálních případech i uhlíkové nanotrubičky (carbon nanotubes, CNT), uhlíková nanovlákna (carbon nanofibers, CNF) nebo ocelářská struska (steel slag, SS) [3]. Těmito příměsemi může být zvýšena i měrná elektrická vodivost pojiv na bázi PC [4].

Vhodnost využití ECC na bázi AAA pro výše zmíněné aplikace závisí na jejich elektrických vlastnostech (čím má ECC nižší měrný elektrický odpor (rezistivitu  $\rho$ ), tím je pro ně vhodnější) [2]. Proto je jejich  $\rho$  stanovována z jejich volt-ampérových (V-A) charakteristik.

Dielektrické vlastnosti ECC na bázi AAA se určují impedanční spektroskopií (IS) [2]. IS je metoda používaná ke zkoumání vlastností materiálů pomocí impedančních spekter – frekvenčních závislostí impedance (zdánlivého elektrického odporu pro střídavý proud,  $Z$ ) [4]. Tyto závislosti se určují ze změřených závislostí střídavého proudu na napětí, pro daný rozsah frekvencí střídavého proudu. Na základě impedančních spekter lze sestavit ekvivalentní (náhradní) obvody k získání informací o elektrických procesech a akumulacích nábojů ve struktuře ECC na bázi AAA a závislostech těchto procesů na složení ECC.

Při určování tepelných vlastností jsou vzorky ECC na bázi AAA zahřívány a jsou měřeny časové teplotní závislosti v určitých bodech vzorků. Následně jsou na jejich základě stanoveny tepelné vlastnosti materiálu vzorku, jako jsou: měrná tepelná vodivost  $\lambda$ , měrná tepelná kapacita  $c$  a teplotní vodivost  $a$  [6–11]. Z hlediska vhodnosti pro stavební aplikace je důležité, aby měl stavební materiál co nejlepší tepelně-izolační vlastnosti a tedy nejmenší  $\lambda$  pro úsporu energie při vytápění [12].

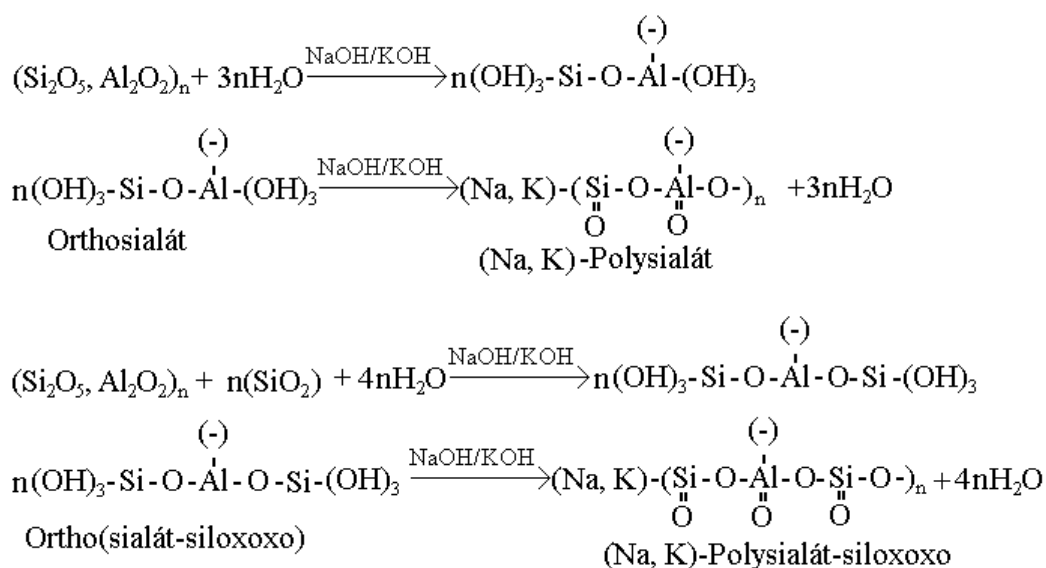
Elektrické, dielektrické i tepelné vlastnosti ECC na bázi AAA velmi výrazně závisí na jeho struktuře [13]. V teoretické části této dizertační práce je shrnuta problematika praktického využití AAA a ECC na bázi AAA. V experimentální části této práce jsou uvedeny souvislosti mezi změřenými V-A charakteristikami, impedančními spektry a tepelnými vlastnostmi vzorků ECC na bázi AAA s přidavky různých uhlíkových částic a jejich strukturou.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

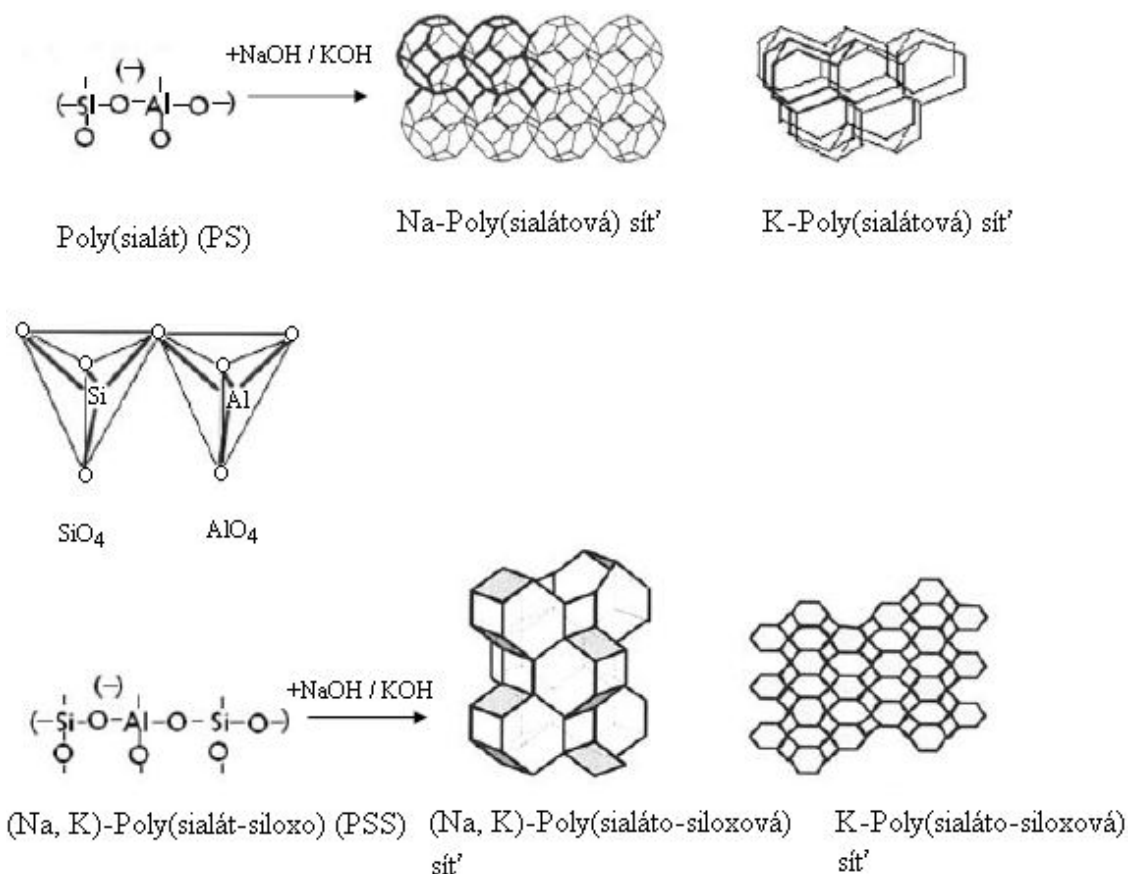
### 2.1 Alkalicky aktivované aluminosilikáty

Aluminosilikáty (hlinitokřemičitany) jsou materiály obsahující ve své struktuře  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{SiO}_2$ . Alkalická aktivace aluminosilikátů (geopolymerizace) je proces, jehož prostřednictvím jsou využívány například pevné odpady a vedlejší produkty různých průmyslových výroby k výrobě kvalitních a levných stavebních poživ. Alkalicky aktivované aluminosilikáty (geopolymery) obsahují síť  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , která byla vytvořena alkalickou aktivací [1]. Na proces alkalické aktivace má velký vliv poměr  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ , koncentrace alkalického aktivátoru, teplota, poměr množství vody a pevné fáze a pH výchozí směsi. Alkalická aktivace je používána například k výrobě alkalicky aktivovaných betonů (alkali-activated concretes, AAC), nebo vázání odpadu obsahujícího těžké kovy. AAC mohou dosahovat mnohem vyšší odolnosti proti vysokým teplotám a agresivnímu prostředí, než betony na bázi PC. AAC získávají většinu své pevnosti během tří až čtyř hodin od začátku geopolymerizace [14].

Alkalická aktivace aluminosilikátů probíhá rozpouštěním aluminosilikátu v roztoku alkalického aktivátoru obsahujícího alkalický kov (hydroxylací) a následně vytvářením jejich amorfní, nebo semikrystalické polymerní sítě, polykondenzací ve které jsou začleněny ionty alkalického kovu (v případě sodného aktivátoru tedy vzniká takzvaný N-A-S-H gel) [14]. Vzniklá polymerní síť je podobná krystalickým zeolitům, které při alkalické aktivaci také vznikají, ale na rozdíl od nich je amorfní. Mechanismus alkalické aktivace aluminosilikátů hydroxidem sodným nebo draselným je znázorněn na Obr. 1 a trojrozměrná struktura AAA je znázorněna na Obr. 2.



Obr. 1: Alkalická aktivace aluminosilikátů pomocí NaOH nebo KOH [14]



Obr. 2: Trojrozměrné struktury různých aluminosilikátových sítí [14]

Obecný vzorec vzniklé polymerní sítě je  $P_D M[-(\text{Si-O})_2-\text{Al-O}]\cdot w\text{H}_2\text{O}$ , kde M je alkalický kov, z je číslo nabývající hodnot 1, 2, nebo 3 a  $P_D$  je výsledný stupeň polymerizace [14]. Pro dosažení vysoké pevnosti a odolnosti výsledného AAA jsou vhodné poměry koncentrací oxidů a vody v těchto mezích:  $\text{M}_2\text{O}/\text{SiO}_2 = 0,2-0,48$ ,  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3,33-4,5$ ,  $\text{M}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 0,8-1,6$  a  $\text{H}_2\text{O}/\text{M}_2\text{O} = 10-25$ . Ve výsledné struktuře AAA by měly být pro zvýšení pevnosti přibližně takové koncentrace všech jednomocných a dvoumocných kationtů, aby svým kladným nábojem vykompenzovaly záporný náboj  $\text{AlO}_2^-$ .

Pro alkalickou aktivaci jsou potřeba velmi silně zásadité látky jako alkalické aktivátory. Často se proto jako alkalický aktivátor používá roztok NaOH s vodním sklem ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) [14]. K alkalické aktivaci lze použít i  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  a  $\text{K}_2\text{SO}_4$ . Optimální teplota alkalické aktivace pro zvýšení pevnosti v tlaku je v rozmezí 70–90 °C a optimální pH je v rozmezí 13–14.

Alkalicky aktivovat lze také aluminosilikáty z alternativních zdrojů, jako jsou například: uhelná hlušina, červený kal, zbytky katalyzátoru pro katalytické krakování, popel z rýžových lusků, popel z výroby palmového oleje, odpadní sklo, odpadní keramika, meta-kaolin, jiné druhy popela, kaly ze zpracování odpadních vod a minerál albit [15].

## 2.2 Využití alkalicky aktivovaných aluminosilikátů

Díky možnosti dosažení lepší odolnosti proti vysokým teplotám a menší měrné tepelné vodivosti oproti hydratovanému portlandskému cementu se v současnosti úspěšně využívají alkalicky aktivované aluminosilikáty například k výrobě žáruvzdorného AAC [16], nebo tepelně izolačního foukaného AAC [12].

Žáruvzdorné AAC vydrží díky přítomnosti odolného N-A-S-H gelu teplotu až 1 200 °C a teplotu 800 °C bez poškození [16]. Oproti tomu betony na bázi PC vydrží maximálně 750 °C a 450 °C bez poškození. Teploty do 600 °C zlepšují u AAA pevnost v tlaku, pevnost v tahu, Youngův modul pružnosti a lomovou houževnatost. AAC dosahují také vyšší elasticity, než betony na bázi PC. Při přípravě AAA také vznikají dle podmínek přípravy zeolity (hydroxysodalit, Na chabazit a zeolit P). AAA často obsahují křemen ( $\text{SiO}_2$ ), mullit ( $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ ) a hematit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

Tepelně-izolační (foukané) AAC dosahují oproti tepelně-izolačním (pěnovým) betonům na bázi PC lepšího poměru pevnosti v tlaku (nosnosti) a hustoty materiálu, menší toxicity pro člověka a menšího zvýšení efektu globálního oteplování [12]. Při výrobě tepelně-izolačních AAC se produkuje přibližně o 64 % méně  $\text{CO}_2$ , než při výrobě stejného množství tepelně-izolačních betonů na bázi PC (odpadá uvolňování  $\text{CO}_2$  z vápence a zpracování za vysokých teplot) a výrobní náklady jsou o 10–30 % nižší.

Alkalickou aktivací popílku vzniklého spalováním radioaktivně znečištěného organického materiálu lze vázat i radioaktivní izotopy prvků, jako jsou Sr a Cs. Při takové alkalické aktivaci za zvýšené teploty vzniká zeolit zvaný pollucit [17]. V pollucitové struktuře se lze vázat i chrom, kadmium, olovo a ostatní těžké kovy. Sumární vzorec pollucitu s vázaným Sr je  $\text{SrAlSi}_2\text{O}_6$ . AAA se také používají pro ukládání těžkých kovů, pro tyto aplikace jsou vhodnější a účinnější, než materiály na bázi PC.

Bylo zjištěno, že náhrada 30% PC v železobetonu úletovým popílkem zvyšuje odolnost materiálu proti korozi způsobené NaCl zvýšením pasivace ocelové výztuže [18]. Takový železobeton s alkalicky aktivovaným úletovým popílkem je tedy vhodný pro části staveb pod mořskou hladinou.

V roce 2010 bylo celosvětově vyprodukováno odhadem 780 milionů tun úletového popílku, většina z tohoto množství byla uložena na skládkách a jen malá část byla využita pro alkalickou aktivaci a k náhradě části produkce PC [14].

Mezi další odpady, které lze alkalicky aktivovat a dále využít jako stavební pojiva patří například stavební suť z betonu na bázi PC, odpad z červených cihel nebo skelný odpad. Tyto odpady představují přibližně 30 % celosvětově vytvářeného pevného odpadu ukládaného do životního prostředí [19]. V současnosti probíhá výzkum jejich dalšího možného využití ve stavebnictví prostřednictvím alkalické aktivace.

## **2.3 Struktura alkalicky aktivovaných aluminosilikátů**

Hutní strusky jsou aluminosilikáty obsahující různé další oxidy. Jsou vedlejším produktem metalurgického průmyslu (například odlévání kovů) [13]. Vyznačují se proto často vysokým obsahem CaO. Úletové popílků (odpady ze spalování) naproti tomu obsahují menší množství CaO (do 10 %).

### **2.3.1 Závislost na složení**

Pro strukturu aluminosilikátů platí níže uvedené skutečnosti [13]:

- Kationty, jako jsou například  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{Mg}^{2+}$  přerušují Si-O vazby a depolymerizací snižují pevnost aluminosilikátové polymerní sítě (vytvářejí nepřemostňující a volné atomy kyslíku).

- K vyjádření míry depolymerizace se často používá  $NBO/T$  (poměr koncentrací nepřemostujících a tetragonálně vázaných atomů kyslíku v polymerní aluminosilikátové síti).

### 2.3.2 Změny způsobené teplotou a jejich vliv na vlastnosti

Tepelné vlastnosti aluminosilikátového skla, skleněné strusky nebo jiného aluminosilikátu (se stupněm zesíťování aluminosilikátů  $P_S > 2,5$ ) se výrazně mění při dosažení určité teploty (zvyšuje se tepelná kapacita, teplotní roztažnost, ...) [13]. Tato změna je způsobena změnou struktury materiálu na superpodchlazenou kapalinu s vlastnostmi pevné látky – skelným přechodem doprovázeným snížením viskozity po dosažení teploty skelného přechodu  $T_g$ , nebo exotermní krystalizací materiálu (u některých aluminosilikátů s  $P_S < 2$ ).

Viskozita u aluminosilikátů s  $P_S > 2,5$  plynule klesá se stoupající teplotou a u aluminosilikátů s krystalickou strukturou ( $P_S \leq 2$ ) po dosažení tzv. teploty přerušení krystalické mřížky se zvyšuje strmost poklesu viskozity se stoupající teplotou.

### 2.3.3 Strukturní parametry

Koncentrace nepřemostujících atomů kyslíku je v aluminosilikátech rovna součtu koncentrací oxidů přerušujících polymerní řetězec (jednomocných a dvoumocných oxidů) nepoužitých pro kompenzaci náboje [13]. Při jejím výpočtu je tedy nutné odečíst koncentraci kationtů trojmocných oxidů. Koncentrace přemostujících kyslíků je koncentrací kationtů v troj-, čtyř- a pětímocných oxidů. Vydělením obou hodnot získáme poměr nepřemostujících atomů kyslíku a tetragonálně vázaných atomů kyslíku ( $NBO/T$ ). Stupeň zesíťování  $P_S$ , který je také mírou stupně polymerizace aluminosilikátů  $P_D$  (viz. Tabulka 1) je vyjádřen vztahem

$$P_S = 4 - NBO / T \quad (1)$$

Tabulka 1: Složení,  $NBO/T$  a  $P_S$  různých struktur v aluminosilikátech s obsahem  $CaO$  [13]

Struktura	Složení	$NBO/T$	$P_S$	Častý výskyt
$SiO_4^{4-}$ (monomer)	$2CaO \cdot SiO_2$	4	0	Ocelářenské strusky
$Si_2O_7^{6-}$ (polyhedron)	$3CaO \cdot 2SiO_2$	3	1	Tavidla, ingoty
$Si_2O_6^{4-}$ (řetězec)	$CaO \cdot SiO_2$	2	2	Tavidla, ocelářenské strusky
$Si_2O_5^{2-}$ (plát)	$CaO \cdot 2SiO_2$	1	3	Skla, uhelná skla
$SiO_2$ (trojrozměrná)	$SiO_2$	0	4	Skla

Jednou z nevýhod hodnocení struktury aluminosilikátů podle  $NBO/T$  je, nemožnost rozlišení rozdílných efektů různých kationtů v jejich struktuře. K charakterizaci struktury aluminosilikátů se proto využívá i optická hustota, která má pro různé kationty rozdílné závislosti na vlnové délce záření [13]. Celková absorbance je součtem absorbancí jednotlivých složek aluminosilikátu při dané vlnové délce záření bez započítání iontů vyvažujících náboje trojmocných kationtů ( $Al^{3+}$ , ...). Optická hustota se zvyšuje spolu s  $P_S$  aluminosilikátů.



### 2.3.4 Vliv strukturních parametrů na vlastnosti

Se stoupajícími hodnotami  $P_S$  (a klesajícími hodnotami  $NBO/T$ ) stoupá viskozita aluminosilikátů a klesá jejich teplotní roztažnost [13].

#### - Vliv na měrnou tepelnou vodivost

Vedení tepla v aluminosilikátech v pevném skupenství probíhá hlavně pohybem tepelně-excitovaných stavů (fononů) na polymerních segmentech aluminosilikátové sítě (pohyb fononů mezi polymerními řetězci je mnohem obtížnější) [13]. Proto měrná tepelná vodivost stoupá se zvyšujícím se obsahem  $SiO_2$  a  $P_S$ , a klesá se stoupající hodnotou  $NBO/T$ . V malé míře probíhá přenos tepla vyzařováním a v tekutých struskách, které jsou ionizované, dochází k přenosu tepla prouděním.

#### - Vliv na elektrické vlastnosti

Vedení elektrického proudu aluminosilikáty v pevném skupenství při aplikaci elektrického pole je způsobeno především pohybem iontů [13]. Protože anionty jsou zde polymerní, dlouhé a tudíž nepohyblivé, je zde elektrická vodivost způsobena kationty. Měrná elektrická vodivost  $\sigma$  způsobená prouděním iontů je potom dána vztahem

$$\sigma = F \sum c_M z_i \mu, \quad (2)$$

kde  $F$  je Faradayova konstanta,  $c_M$  jsou molární koncentrace,  $z_i$  jsou náboje a  $\mu$  jsou pohyblivosti jednotlivých druhů iontů. Teplotní závislost je dána Arrheniovou závislostí

$$\sigma = A_k \exp(-B_k / T), \quad (3)$$

kde  $A_k$  je předexponenciální faktor a  $B_k = E_{AP}/R_m$  (molární aktivační energie povrchového napětí  $E_{AP}$  dělená univerzální plynovou konstantou  $R_m$ , jednotkou je Kelvin).

Měrná elektrická vodivost pevných aluminosilikátů klesá s rostoucí velikostí polymerních segmentů  $P_D$  (a také se zvyšováním stupně zesíťování  $P_S$  a snižováním  $NBO/T$ ) [13]. Povaha přítomných kationtů a jejich náboj také ovlivňují měrnou elektrickou vodivost, dvoumocné kationty musí při svém pohybu překonávat dvě vazby, zatímco jednomocné kationty jen jednu vazbu. Proto například  $Na_2O$  více přispívá k měrné elektrické vodivosti aluminosilikátů, než stejné množství  $CaO$ . Oxidy železa vyskytující se ve více valencích ( $Fe^{3+}/Fe^{2+}$ ) velmi zvyšují měrnou elektrickou vodivost aluminosilikátů díky umožnění přenosu elektrického proudu prostřednictvím volných elektronů a v důsledku toho je při vysokém obsahu těchto oxidů vliv  $P_S$  na měrnou elektrickou vodivost aluminosilikátu zanedbatelný.

### 2.3.5 Modelování vlastností

Pro určování fyzikálních vlastností aluminosilikátů lze využít matematické výpočty (modelování) na základě jejich chemického složení [13]. Vytváření spolehlivých výpočetních modelů vyžaduje dobré znalosti závislostí jejich fyzikálních vlastností (viskozity, hustoty, měrné tepelné vodivosti aluminosilikátu, ...) na chemickém složení aluminosilikátu. Požadované hodnoty fyzikálních vlastností jsou počítány různými metodami. Nejjednodušší používanou metodou je určení hodnot fyzikálních vlastností (například teploty tání  $T_{liq}$ ), pomocí funkcí chemických složení. Složitější modely stanovují fyzikální vlastnosti ze strukturních parametrů aluminosilikátů daného chemického složení. V případě závislosti  $T_{liq}$  na chemickém složení lze pomocí fázových diagramů použít rovnice odvozené z termodynamických údajů dvousložkových systémů.

Výpočty na základě výpočetních modelů jsou však méně přesné, než výsledky měření [13]. Modely na bázi struktury aluminosilikátů často používají:

1. koncentrace přemostřujících, nepřemostřujících a nevazebných atomů kyslíku,
2. koncentraci nepřemostřujících atomů kyslíku dělenou koncentrací tetragonálně vázaných atomů kyslíku ( $NBO/T$ ),
3. optickou hustotu nebo
4. změnu přebytku volné energie  $\Delta G_{XS}$ , která je mírou pevnosti vazeb.

#### - *Parciální molární modely*

Vlastnosti, jako jsou například měrná tepelná kapacita  $c$  nebo slučovací entropie ( $\Delta S_{FUS}$ ) a hustota  $\rho$  jsou strukturou aluminosilikátů také ovlivněny. Hodnoty těchto veličin ale mohou být přesto pro krystalickou i amorfni aluminosilikátovou fázi při dané teplotě odhadnuty za použití rovnice pro parciální molární veličiny

$$P = \sum_{x=1}^n x_x P_x, \quad (4)$$

kde  $n$  je počet složek,  $x_x$  jsou molární zlomky složek a  $P_x$  hodnoty dané parciální molární veličiny všech jednotlivých složek v čisté podobě [13]. Hustota aluminosilikátu je také parciální molární vlastností, ale parciální molární hustoty jsou závislé na koncentraci složek (u  $SiO_2$  a  $CaO$  s jejich rostoucí koncentrací v aluminosilikátu stoupají).

### - *Další typy počítačových modelů*

Další typy výpočetních modelů používané pro vyhodnocení vlastností aluminosilikátů jsou: numerická zobrazení, modely neuronových sítí, termodynamické modely a molekulárně-dynamické modely [13].

Numerická zobrazení se využívají například k výpočtům  $T_g$  a  $T_{liq}$  ze složení aluminosilikátů. Při výpočtu jsou sečteny konstanty násobené koncentracemi příslušných složek aluminosilikátů [13].

Modely neuronových sítí jsou založené na více vrstvách, například na – vstupní, střední a výstupní vrstvě [13]. Výpočetní algoritmus neuronových sítí se učí, dokud nedosáhne požadovaného výsledku, nebo chyby v požadovaných mezích. Tyto modely lze využít například k výpočtům viskozity a povrchového napětí. Modely neuronových sítí založené na struktuře využívají obvykle  $P_S$ ,  $NBO/T$  nebo optickou hustotu k určení vlastností aluminosilikátů.

Termodynamické modely využívají fázové rovnováhy a termodynamická data různých dvousložkových systémů (například směsi  $CaO-SiO_2$ ,  $FeO-SiO_2$ , ...) [13]. Tyto modely se používají například k určení fázových diagramů, chemických aktivit, Gibbsových energií, entalpií,  $C_t$ ,  $T_{liq}$ ,  $T_{sol}$ . Teplota tání  $T_{liq}$  může být vyšší, než teplota tuhnutí  $T_{sol}$ , v tomto případě se nachází fázová rovnováha mezi  $T_{liq}$  a  $T_{sol}$ . Při použití polynomiálních rovnic lze termodynamické modely použít i pro systémy s větším počtem složek. V poslední době se tyto modely začaly využívat i pro výpočty hustoty, viskozity a povrchového napětí aluminosilikátů. Viskozita popisuje pohyb kapaliny, který souvisí s pevností vazeb mezi částicemi a tedy také s termodynamikou. Pro viskozitu přibližně platí Arrheniova rovnice

$$\eta = A_w T \exp(E_{AV} / R_m T), \quad (5)$$

kde  $\eta$  je viskozita,  $A_w$  předexponenciální faktor,  $T$  termodynamická teplota,  $E_{AV}$  molární aktivační energie viskozity a  $R_m$  univerzální plynová konstanta.

Molekulárně-dynamické modely používají simulace pohybu částic v určitém časovém rozmezí, ze získaných údajů mohou vypočítat například viskozitu a rychlosti difuze částic v aluminosilikátu [13]. Přesnost těchto výpočtů je omezena přesností funkcí potenciální energie mnoha systémů obsažených v aluminosilikátech.

## 2.4 Elektricky vodivé příměsi do betonových matric a jejich využití

Elektricky vodivé příměsi do betonových matric k výrobě elektricky vodivých betonů (electrically conductive concretes, ECC) – grafitový prášek (GP), uhlíková vlákna (CF), uhlíkové saze (CB), niklový prášek (NP), ocelová vlákna (SF), ve speciálních případech i uhlíkové nanotrubičky (CNT), uhlíková nanovlákna (CNF) a ocelárenská struska (SS) a další příměsi se zmenšováním rozměrů částic a zvětšováním poměru stran stále více zvyšují vodivost výsledného ECC [3]. Měrná elektrická vodivost ECC závisí také na druhu příměsi, stupni jejího rozptýlení a na kvalitě rozhraní elektricky vodivé příměsi a betonové matrice. Ze závislosti měrné elektrické vodivosti ECC na koncentraci vodivé příměsi lze zjistit, že se při dosažení určité koncentrace příměsi s rostoucí koncentrací výrazně zvyšuje elektrická vodivost ECC díky vytváření uspořádané sítě. Tato koncentrace, při které je elektrická rezistivita ECC poloviční oproti samotné betonové matici se nazývá perkolační práh (viz Obr. 6) a klesá se snižováním rozměrů a poměru stran použitých částic.

ECC lze využít pro výrobu senzorů zatížení konstrukce, rozvoje trhlin a poškození. Snímání pomocí ECC senzorů je založeno na tom, že při poškození elektricky vodivé sítě v betonové matici například díky trhlině klesá elektrická vodivost senzoru. Při tlakovém zatížení vodivého betonu se také mění propojení jeho elektricky vodivé sítě a tím i jeho měrná elektrická vodivost. Při zacelování trhlin naopak dochází ke zvyšování měrné elektrické vodivosti ECC. Za normálních podmínek a za použití vhodného disperzantu (např. metylcelulózy nebo latexu) platí do určitého tlaku lineární závislost mezi snížením měrné elektrické vodivosti materiálu a snížením jeho pevnosti v tahu při vzniku trhlin. Toto je u senzorů rozvoje trhlin žádoucí. Jiné disperzanty, jako je například  $\text{SiO}_2$  mohou naopak tuto závislost delinearizovat díky snížení tlaku potřebného k uzavření trhlin [20]. Betony bez vodivých příměsí nevykazují žádnou změnu elektrického odporu při tlakovém zatížení, pokud nevznikají trhliny [3]. Sensory rozvoje trhlin na základě ECC lze využít například při stavbách dálnic, mostů, jaderných elektráren a jiných staveb ke zvýšení jejich bezpečnosti. Výhodami senzorů rozvoje trhlin na bázi ECC oproti jiným standardně používaným řešením jsou: vysoká citlivost, dobré mechanické vlastnosti, kompatibilita s monitorovaným betonem, stejná životnost, jako monitorovaný beton a snadná instalace a údržba díky zabudování do betonové konstrukce.

Pro objemové elektrické vytápění je třeba, aby ECC měl co největší měrnou elektrickou vodivost a měrnou tepelnou vodivost [4]. Objemové elektrické vytápění lze použít například pro odmrazování příjezdových cest, mostů, dálnic a sportovních drah a pro ochranu před riziky spojenými se vznikem vrstev ledu nebo sněhu. Tím se šetří také náklady na posypovou sůl a pracovní síly. Alternativně používaný způsob vytápění betonů nikl-chromovými dráty má oproti použití ECC nevýhody v nízké životnosti drátů, špatné opravitelnosti závad a nehomogenitě ohřevu.

ECC lze využít také ke stavbě elektromagneticky stíněných konstrukcí. Elektromagnetické stínění lze využít například pro zvýšení citlivosti komunikace mezi bezdrátovými zařízeními uvnitř konstrukce, nebo za účelem ochrany proti špionáži [4]. Jako antikoroziní ochranu kovových prutů zabudovaných v betonech lze využít například katodovou ochranu spočívající v zapojení kovových prutů jako katody v elektrickém obvodu, ke snížení jejich elektrického potenciálu a tím i rychlosti koroze kovových prutů. Při využití ECC odpadá nutnost používání obvykle používaných zinkových elektrod.

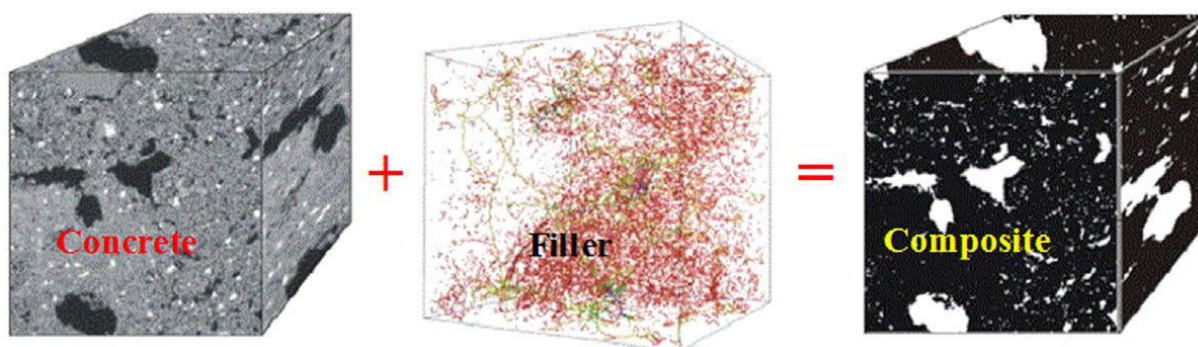
### 2.4.1 Struktura elektricky vodivého betonu

Elektricky vodivý beton (ECC) je vícefázový kompozit, který je tvořen betonovou matricí a elektricky vodivým materiálem. Betonová matrice ECC se skládá z minerálních agregátů a elektricky vodivých příměsí, které jsou spojeny dohromady pojivem (viz *Obr. 3*) [3], [21].

Jsou rozlišovány tři úrovně distribuce [21]:

- Distribuce elektricky vodivých příměsí v pojivu
- Distribuce pojiva s elektricky vodivými příměsemi mezi jemnými minerálními agregáty
- Distribuce jemných agregátů s pojivem a elektricky vodivými příměsemi mezi hrubými minerálními agregáty

Protože částice elektricky vodivých příměsí jsou mikročástice nebo nanočástice s vysokým měrným povrchem, mají jejich rozhraní s pojivem výrazný vliv na výsledné vlastnosti ECC [21]. Čím silnější je vazba mezi pojivem a betonovou matricí v ECC, tím vyšší je měrná elektrická vodivost ECC, proto je při jejich přípravě důležitá čistota elektricky vodivých příměsí. Ve struktuře ECC jsou přítomny také póry se vzduchem. Porozita ECC negativně ovlivňuje jeho měrnou elektrickou vodivost.



*Obr. 3: Struktura elektricky vodivého betonu – kompozitu (Composite) složeného z betonu (Concrete) a plniva (Filler) [3], [21]*

### 2.4.2 Rozptyl příměsí v elektricky vodivém betonu

Stoupající poměr stran částic příměsí klade větší nároky na rozptýlení částic. Mechanické míchání nebo mletí není pro dlouhé částice s vysokým poměrem stran (CF, SF) vhodné, protože by při něm mohlo docházet k lámání částic [3]. Pro tyto částice jsou vhodné metody rozptylování v ultrazvuku, kovalentních a nekovalentních povrchových modifikací. Tyto modifikace se používají ke zvýšení smáčivosti povrchu a ke snížení aglomerace částic elektricky vodivé příměsí. Vzhledem k šetrnosti k plnivu, nízké spotřebě energie a lepší kontrole jsou lepší nekovalentní povrchové modifikace.

V tabulce (Tabulka 2) jsou uvedeny různé často používané příměsi pro rozptyl různých elektricky vodivých příměsí v ECC [22].

Tabulka 2: Různé druhy dispergátorů používané k rozptylování elektricky vodivých příměsí v betonech [22]

Kategorie	Dispergující materiál	Vhodné objekty k dispergaci	Vhodné příměsi k dispergaci
<b>Povrchově aktivní látka</b>	Látka redukující obsah vody	Funkční plniva a částice cementu	CNT, CNF, CB, GP, NP
	Metylcelulóza	Funkční plniva	CF, CNT
	Karboxymetylcelulóza	Funkční plniva	CF
	Karboxyetylcelulóza	Funkční plniva	CF
	Hydroxypropyl-metylcelulóza	Funkční plniva	CF
	Dodecylsulfát sodný	Funkční plniva	CF, CNT
	Dodecylbenzensulfonát sodný	Funkční plniva	CF
	Dodecylbenzensulfonát sodný s polyakrylovou kyselinou	Funkční plniva	CF
<b>Minerální příměs</b>	Oxid křemičitý	Funkční plniva a částice cementu	CF, CB, SF, NP
	Úletový popílek	Funkční plniva a částice cementu	SS

## 2.4.3 Elektrický proud v elektricky vodivých betonech

### 2.4.3.1 Elektrody

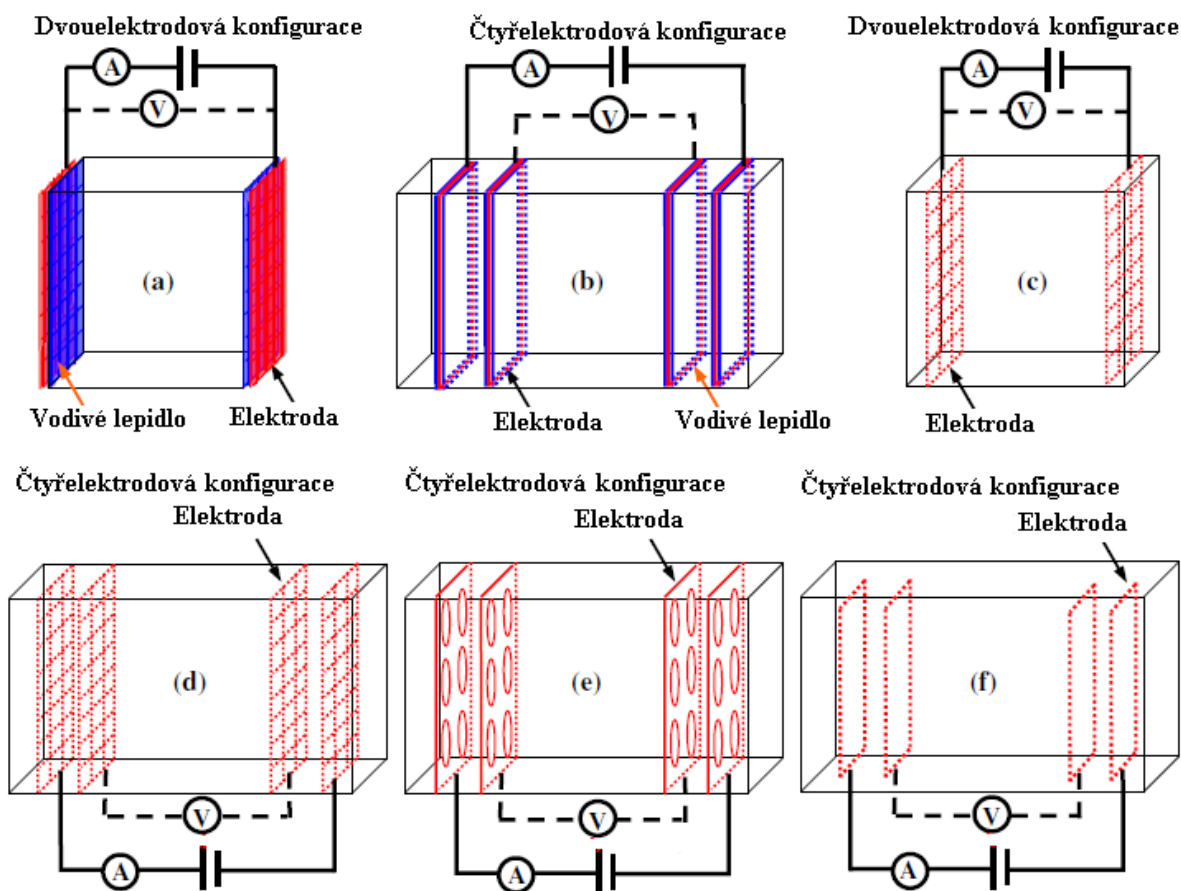
ECC jsou často nakontaktovány buď dvěma elektrodami (dvouelektrodová konfigurace), nebo čtyřmi elektrodami (čtyřelektrodová konfigurace) [3].

Na rozhraní připojených kovových elektrod a elektricky vodivého betonu se vytváří potenciálový rozdíl. Díky tomu vzniká na rozhraní elektrická dvojvrstva [13]. Do určité vzdálenosti od rozhraní se tak v elektricky vodivém betonu vyskytují pouze aniony.

Výhodou dvouelektrodové konfigurace je její jednoduchost, proto je její využití vhodné například při objemovém vytápění [3]. Její nevýhodou je zkreslení měřeného napětí vyvolané polarizací iontů na elektrodách, proto je její použití v senzorech na bázi ECC nevhodné.

V čtyřelektrodové konfiguraci, může sloužit jeden pár elektrod jako zdroj elektrického proudu a k měření jeho velikosti, zatímco druhý pár elektrod umístěný v prostoru mezi prvním párem elektrod slouží ke snímání elektrického napětí [3]. Toto zapojení má proto výhodu značného snížení vlivu polarizace iontů na měřené elektrické napětí a také snížení elektrického odporu rozhraní měřících elektrod a vyšší citlivosti měření. Z toho důvodu je tato konfigurace vhodná pro senzory tlaku, trhlin a poškození na bázi ECC.

U materiálů elektrod je požadována vysoká a stabilní měrná elektrická vodivost [3]. Proto se často používají různé kovy a slitiny (měď, nerezová ocel, stříbro ...), ve formě zalitých sít, desek, nebo děrovaných desek. Na Obr. 4 jsou uvedena často používaná uspořádání elektrod v dvouelektrodových i v čtyřelektrodových konfiguracích.



Obr. 4: Často používaná uspořádání a upevnění elektrod v ECC [3]

#### 2.4.3.2 Způsoby vedení elektrického proudu

Vedení elektrického proudu v ECC probíhá třemi níže uvedenými vzájemně se doplňujícími způsoby [3].

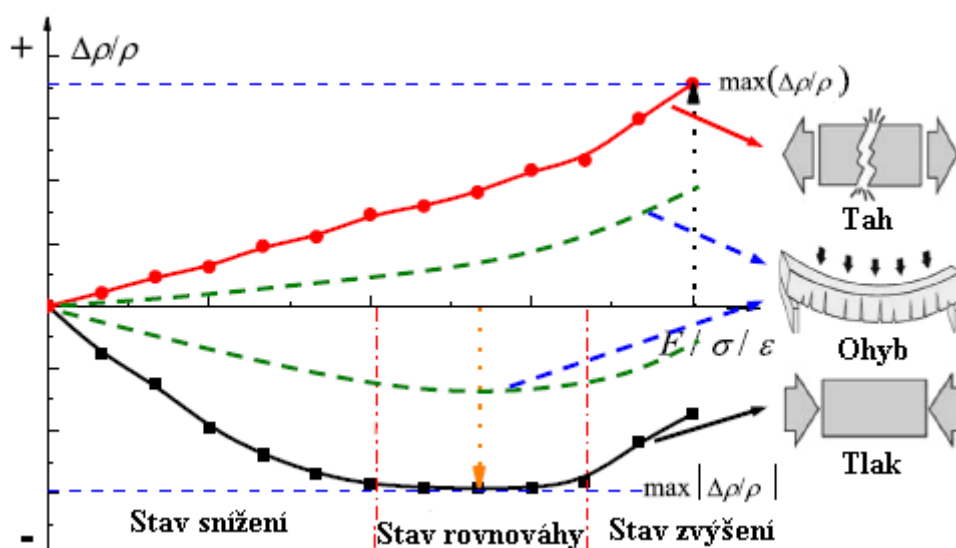
1. Přímé vedení elektrického proudu probíhá mezi spojenými sousedícími částicemi elektricky vodivého přídavku, které tak tvoří vodivou cestu [3]. Nosiči náboje jsou obvykle volné elektrony, v případě uhlíkových částic to mohou být i díry. Dominantnost přímého vedení se projevuje linearitou V-A charakteristik.
2. Tunelující vedení elektrického proudu neboli vedení s polem způsobenou emisí probíhá mezi nespojenými sousedícími částicemi elektricky vodivého přídavku, jejichž vzdálenost je menší, než 10 nm [3]. Emise elektronů elektrickým polem je zde způsobena tunelovým jevem indukovaným lokálními silnými elektrickými poli. U řady elektricky vodivých příměsí je nutno použít dostatečně vysoká napětí pro dosažení vysokých intenzit elektrického pole a požadovaného tunelového jevu, nicméně některé typy částic, jako jsou například ostnaté částice NP nebo částice CNT mohou indukovat dostatečně silná elektrická pole pro tunelující vedení na svých ostrých zakončeních i při mnohem nižší intenzitě elektrického pole a tedy také při nižším napětí.

- Iontové vedení elektrického proudu probíhá prostřednictvím ve vodě rozpuštěných iontů způsobujících vedení elektrického proudu vodou obsaženou v aluminosilikátové fázi a v pórech ECC, jako jsou například  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{OH}^-$ , [3]. Menší kationty procházejí lépe mezerami v polymerní síti aluminosilikátu, ale jsou lépe polarizovatelné a tudíž jsou snadněji zachycovány. Kationty využitě k udržování rovnováhy nábojů se nepodílí na vedení elektrického proudu [13].

### 2.4.3.3 Měření změn rezistivity v tlakových senzorech

Měřenou veličinou je relativní změna rezistivity  $\Delta\rho/\rho$ . Změna rezistivity  $\Delta\rho/\rho$ , která klesá při tlakovém zatížení ECC, stoupá při jeho tahovém zatížení a vykazuje křivkovou závislost při jeho ohybu (viz Obr. 5) [3]. Pokud je dosaženo maximálně 75 % maximálního tlaku, je změna  $\Delta\rho/\rho$  plně reverzibilní, při větším zatížení vznikají trhliny a rezistivita se zvyšuje. Snížení  $\Delta\rho/\rho$  může dosáhnout 80 % v případě použití ECC s NP, 50 % pro ECC s CB nebo s SS a 45 % ECC s CF.

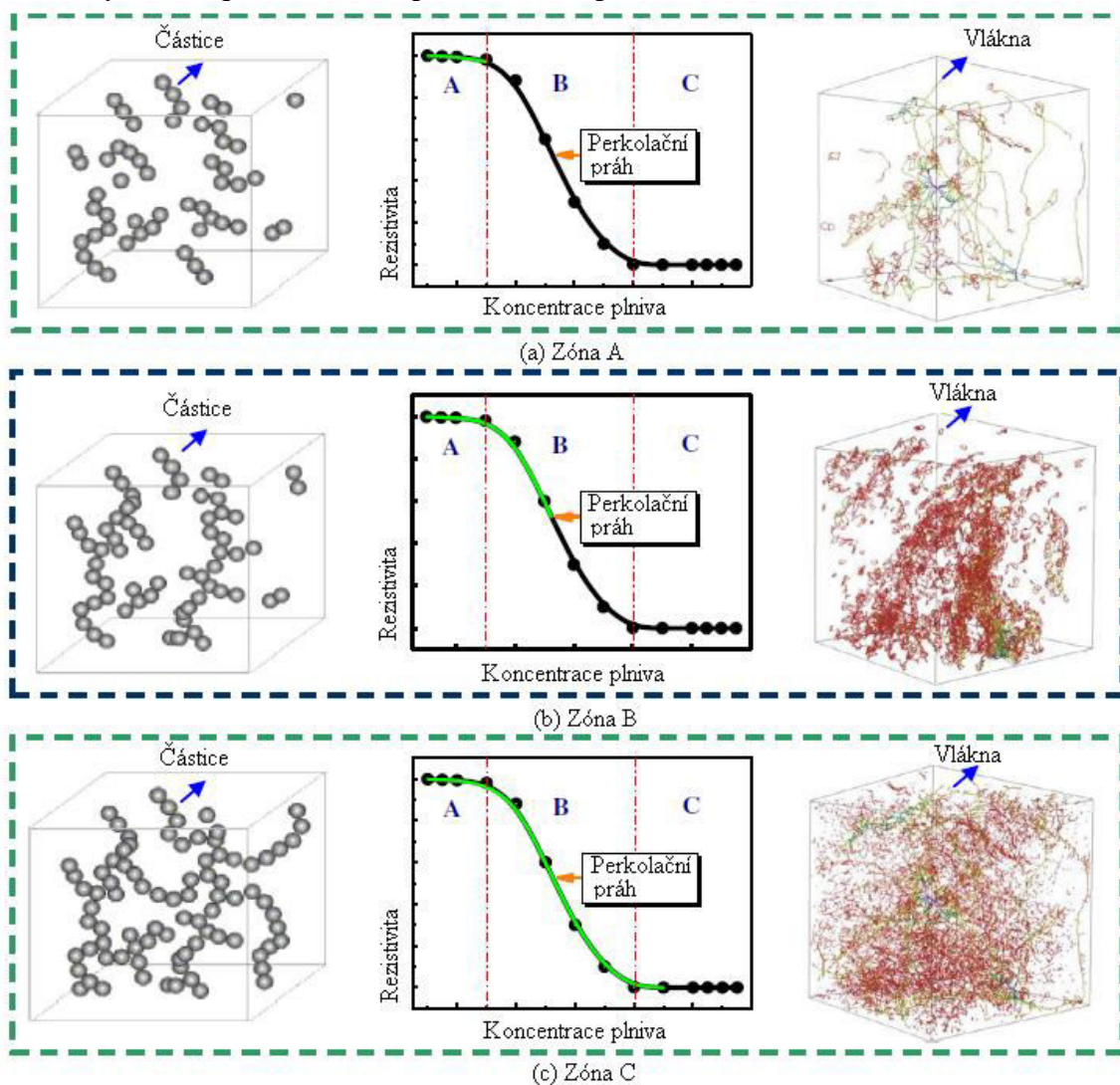
Rezistivita ECC závisí na druhu a koncentraci obsažené elektricky vodivé příměsi, dále na jeho teplotě a vlhkosti (se stoupající vlhkostí klesá rezistivita díky iontovému vedení elektrického proudu) [3]. Dále rezistivita závisí na působení korozivních chemikálií, mechanickém namáhání, počtu cyklů vlhnutí a vysoušení, počtu cyklů mrznutí a tání. Tyto vlivy poškozují strukturu ECC a zvyšují jeho rezistivitu.



Obr. 5: Typické odezvy relativní změny rezistivity  $\Delta\rho/\rho$  elektricky vodivého betonu při působení tlaku [3]



Elektrický proud teče při nízkých koncentracích elektricky vodivé příměsi v ECC hlavně přes betonovou matici, protože elektricky vodivá příměs nevytváří vodivou síť (zóna A na Obr. 6 nahoře) [3]. Takový ECC vykazuje malou, nebo žádnou závislost  $\Delta\rho/\rho$  na tlaku (citlivost) a nemůže být proto použit ke snímání tlaku. Při vyšších koncentracích (zóna B na Obr. 6 uprostřed) začíná elektricky vodivá příměs vytvářet vodivou síť a při změně tlaku má na rezistivitu ECC vliv změna vazeb mezi částicemi příměsi a betonovou maticí, vazeb mezi částicemi příměsi, změna rezistivity částic příměsi a u některých příměsí s ostrými hranami změna intenzity tunelového jevu a beton tak vykazuje dobrou tlakovou citlivost. Při vysokých koncentracích přídavku (zóna C na Obr. 6 dole) je vytvořena vodivá síť příměsi stabilní a změna tlaku již nemá téměř žádný vliv na změnu vazeb mezi částicemi elektricky vodivé příměsi a proto ECC vykazuje nižší, ale stabilnější citlivost oproti betonu s koncentrací příměsi v zóně B. Pro ECC používané v tlakových senzorech je proto nejlepší koncentrace elektricky vodivé příměsi blízká perkolačnímu prahu.

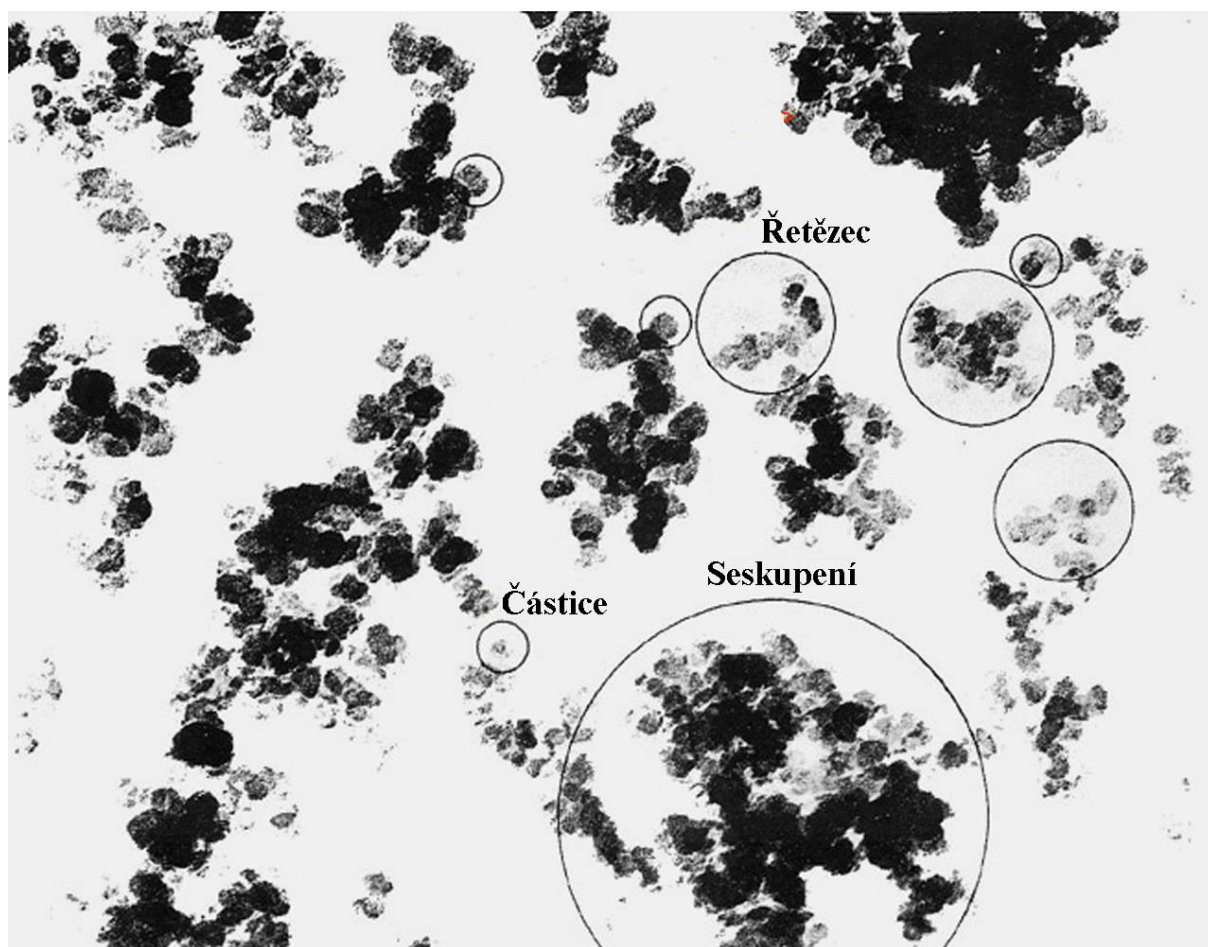


Obr. 6: Změny rezistivit a struktur elektricky vodivých betonů v závislosti na koncentracích elektricky vodivých příměsí ve formě vláken nebo kulových částic [3]

#### 2.4.4 Uhlíkové saze

Uhlíkové saze (carbon black, CB) jsou amorfnní uhlíkové částice vyznačující se vysokým měrným povrchem. CB můžeme rozdělit na acetylenové saze, plynové saze, pecní saze, lampovou čern a tepelné saze [22]. Všechny typy CB mohou být charakterizovány distribucí primárních částic, stupněm jejich zřetězení a seskupování a také chemikáliemi adsorbovanými na jejich povrchu. Komerčně produkované saze mají obvykle částice o průměru mezi (10–400) nm a průměrnou délku řetězců v rozmezí (100–800) nm.

Mezi výhody uhlíkových sazí patří jejich nízká hustota, vysoká chemická a tepelná stabilita, stálá elektrická vodivost a nízká cena. CB se často používají k výrobě ECC pro senzorové aplikace (snímání tlaku, trhlin a poškození) [22]. CB mohou mít perkolační práh pod 1 % hmotnosti v ECC a jejich použití je také vhodné k objemovému vytápění [3].



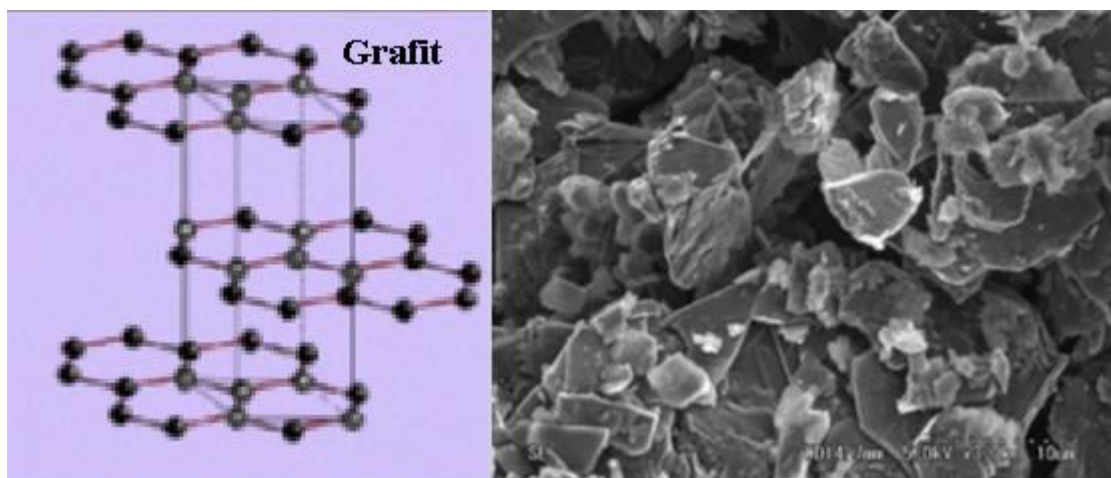
Obr. 7: Uhlíkové saze, jejich částice, řetězce (agregáty) a seskupení (aglomeráty)

#### 2.4.5 Grafitový prášek

Grafit je polymorfní forma uhlíku s vrstvenou plošnou strukturou. Atomy uhlíku jsou v něm uspořádány v mřížce, ve které je vzdálenost mezi sousedními atomy ve vrstvě 0,142 nm a vzdálenost mezi vrstvami je 0,335 nm [22]. Protože kovalentní vazby v grafitu nejsou pevně spojeny, je grafit měkký. Grafit existuje ve třech formách: vložka, krystalická forma a polokrystalická (amorfnní) forma zobrazená na Obr. 8. Grafit má dobrou měrnou elektrickou vodivost a měrnou tepelnou vodivost a také žáruvzdornost a chemickou stabilitu.



Jako elektricky vodivý přídavek se v praxi používají mikročástice grafitu – grafitový prášek (GP) [22].

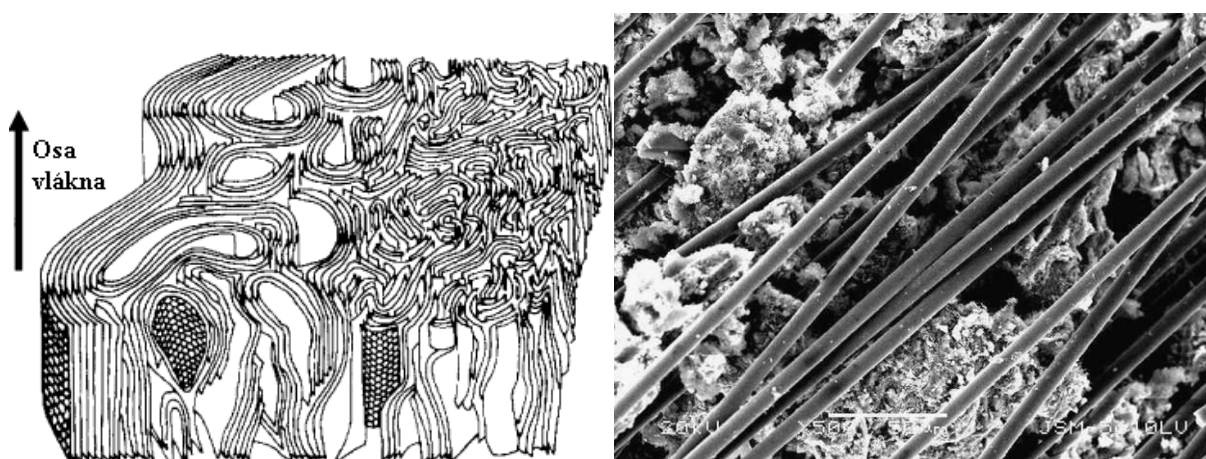


Obr. 8: Struktura grafitu (vlevo) a mikrofotografie GP (vpravo) [22]

## 2.4.6 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna (carbon fibers, CF) jsou mikrovlákná složená z nepravidelně uspořádaných grafitových vrstev, které mají obvykle průměr v rozmezí (5–10)  $\mu\text{m}$  [23]. Díky krystalické struktuře obsaženého grafitu mají CF velkou pevnost a elektrickou vodivost. Při velkém mechanickém namáhání ECC s obsahem CF však dochází k posouvání grafitových vrstev v CF a tím i k degradaci CF.

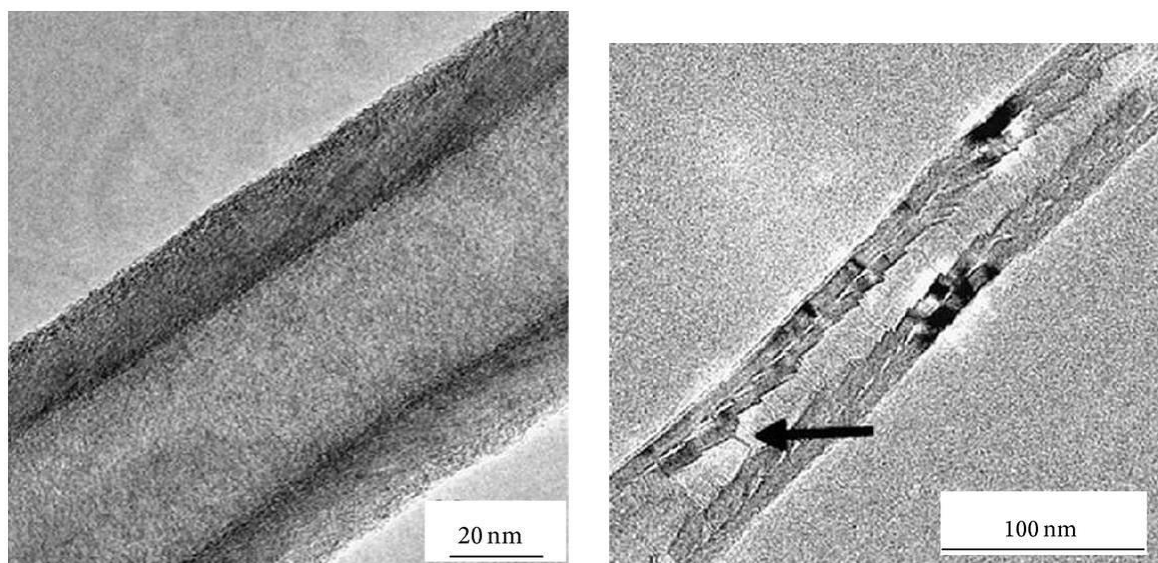
Hustota CF vyrobených z polyakrylonitrilu (PAN) je přibližně  $1\,770\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  [23]. V praxi jsou dobře použitelné CF s délkou přibližně 5 mm [24]. CF mají vysokou chemickou stabilitu a pevnost (srovnatelnou s ocelovými vlákny) a díky svému vysokému poměru stran zpevňují ECC [3].



Obr. 9: Struktura uhlíkových vláken (vlevo) [23] a mikrofotografie uhlíkových vláken pořízená skenovací elektronovou mikroskopií (SEM, vpravo) [24]

## 2.4.7 Uhlíková nanovlákná

Uhlíková nanovlákná (carbon nanofibers, CNF) jsou nanovlákná s dutým jádrem a jednou, nebo více vrstvami grafitu [25]. Mohou být ve skládaném, nebo v neskládaném tvaru, neskládaný tvar je v ECC výhodnější díky silnější vazbě k betonové matici a většímu měrnému povrchu. Mají průměr v rozmezí (3–100) nm a délku v rozmezí (0,1–1 000)  $\mu\text{m}$ . CNF mají vysokou měrnou elektrickou vodivost, pevnost v tahu (až 12 GPa), Youngův modul pružnosti (až 600 GPa), dobrou měrnou tepelnou vodivost, odolnost vůči vysokým teplotám a vůči korozi. V elektricky vodivých betonech zvyšují jejich pevnosti v tahu (bylo zaznamenáno zvýšení až o 75 %) a tlaku a Youngův modul pružnosti. Pro jejich použití v betonové matici je třeba jejich dodatečná dispergace. CNF jsou vyráběna procesem chemického nanášení z plynné fáze (chemical vapor deposition – CVD).



Obr. 10: CNF zobrazené transmisní elektronovou mikroskopií (TEM): jednovrstvé (vlevo) a dvouvrstvé (vpravo) [25].

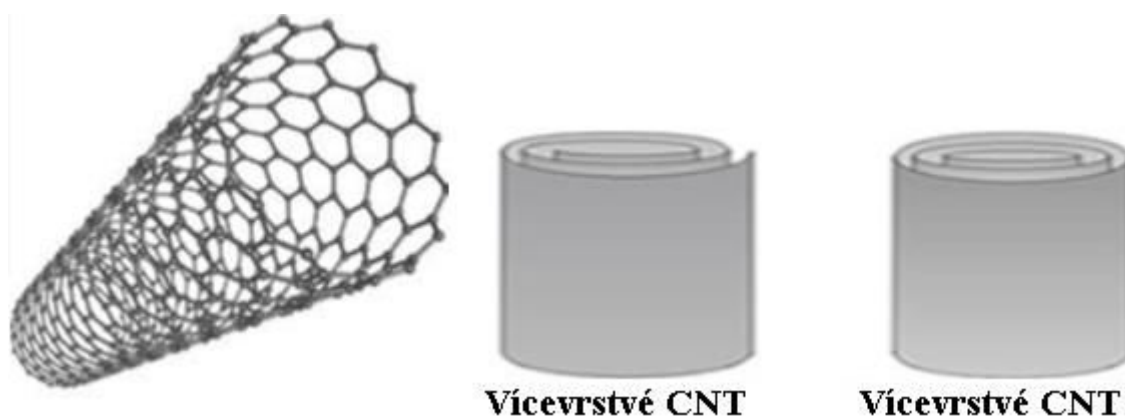
## 2.4.8 Uhlíkové nanotrubičky

Uhlíkové nanotrubičky (carbon nanotubes, CNT) jsou válcovité duté částice, které mohou dosahovat velmi vysokého Youngova modulu pružnosti (až 1 TPa) a pevnosti v tahu (až 200 GPa) při hustotě přibližně  $1\,300\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Mají průměr v nanometrovém měřítku a vysoký poměr stran (poměr délky a průměru) [25]. Jako příměsi do jiných materiálů zvyšují jejich pevnost více, než uhlíková vlákna. CNT jsou teplotně stabilní až do  $2\,800\text{ }^{\circ}\text{C}$  (pokud nedochází k jejich oxidaci), mají vysokou měrnou tepelnou vodivost srovnatelnou s diamantem a měrnou elektrickou vodivost (přibližně tisícinásobnou oproti mědi). Mají také schopnost pohlcovat do své struktury kationty těžkých kovů, jako jsou například Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, trojmocné kovy a aktinoidy.

CNT se dělí na dva druhy: jednovrstvé CNT – single-walled CNT (SWCNT), které tvoří jedna vrstva grafitu stočená do válce a vícevrstvé CNT – multi-walled CNT (MWCNT), které tvoří více vrstev grafitu stočených do válce (viz Obr. 11) [25]. Průměr MWCNT se pohybuje v rozmezí (5–50) nm. MWCNT dosahují vyšší pevnosti v tlaku (až 500 MPa) než SWCNT a mnohem vyšší než uhlíková vlákna a proto v ECC více zvyšují jejich pevnost v tlaku.

Další výhodou užití CNT v elektricky vodivých betonech je zpevňování mikrotrhlin a zabráňování jejich vytváření [25]. CNT také zvyšují Youngův modul pružnosti v ECC a snižují jejich porozitu. Při použití CNT jako přísadky v ECC je potřeba je vhodně dispergovat.

CNT lze vyrobit například obloukovými výboji, laserovým odpařováním nebo chemickým nanášením z plynné fáze (CVD) [25]. Obloukové výboje a laserové odpařování produkují velice čisté CNT s vysokými výrobními náklady. Oproti tomu CVD sice produkuje méně čisté CNT, ale s mnohem menšími výrobními náklady, než obloukové výboje a laserové odpařování.



Obr. 11: Struktura jednovrstvých (vlevo) a vícevrstvých (uprostřed – peleta a vpravo) [25]

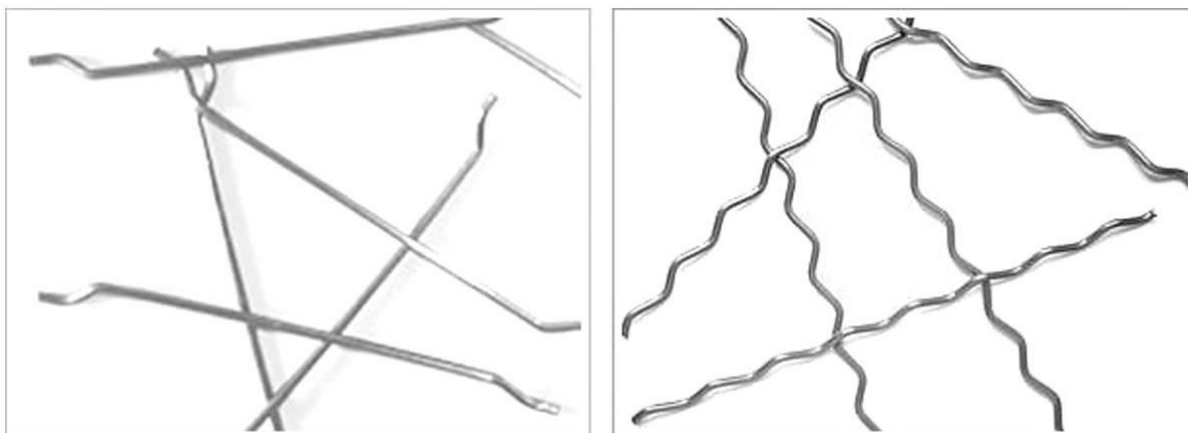
Díky svému velmi vysokému poměru stran, duté struktuře a nízké hustotě mohou CNT snadno tvořit vodivou a zpevňující síť v ECC již při hmotnostní koncentraci 0,05 %. CNT [3] mají také velmi zajímavé snímací vlastnosti, protože ECC s CNT vykazují lineární a zcela vratnou odezvu měrné elektrické vodivosti na tlak a způsobenou deformaci. Použitím ECC s CNT a s uhlíkovými vlákny lze docílit ještě lepší citlivosti a spolehlivosti snímání tlaku.

#### 2.4.9 Ocelová vlákna

Ocelová vlákna (steel fibers, SF) jsou kovový materiál používaný k vyztužení betonu. Poměr stran (poměr délky a průřezu) se u nich obvykle pohybuje v rozmezí (20–100) [22]. Mají různé průřezy, které musí být dostatečně malé, aby byly náhodně rozptýleny v tuhnoucí betonové směsi za použití obvyklých způsobů míchání. Správná množství ocelových vláken v betonu značně zvyšují jeho odolnost proti praskání, nárazu, únavě materiálu a ohýbání, dále houževnatost, trvanlivost, atd.

Ocelová vlákna můžeme rozdělit do pěti skupin v závislosti na procesu výroby, jejich tvaru a procesu jejich rozmělnění: za studena tažené dráty, řezané plechy, odlité z taveniny, rozemleté dráty a pozměněné za studena tažené dráty [22].

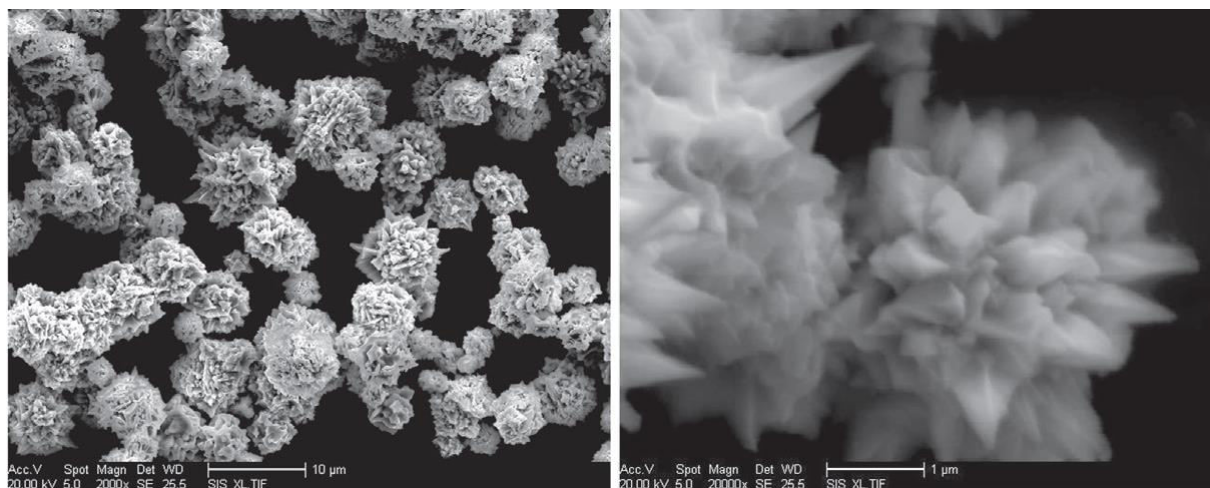
ECC s ocelovými vlákny mohou vykazovat přibližně pětinasobnou elektrickou vodivost ve srovnání s ECC se stejnou hmotnostní koncentrací uhlíkových vláken podobných rozměrů. SF oproti CF také mnohem lépe stíní mikrovlny o frekvenci 1 GHz [4].



*Obr. 12: Příklady ocelových vláken [22]*

#### **2.4.10 Niklový prášek**

Nikl je přechodný kov, který je velmi tažný, což je velmi žádoucí z hlediska jeho kombinace s ostatními kovy [26]. Díky své vysoké měrné elektrické vodivosti, měrné tepelné vodivosti, dobrým mechanickým a magnetickým vlastnostem a vysoké odolnosti proti korozi (například alkáliemi) se často používá niklový prášek (nickel powder, NP) jako elektricky vodivá příměs do ECC. Nanočástice nebo mikročástice NP mohou mít kulovitý tvar s ostnatými povrchovými výstupky, které způsobují vznik velmi silných elektrických polí (až tisícínásobné zvětšení intenzity elektrického pole oproti kulovitým částicím) při vstříknutí náboje. Tento efekt velice zvyšuje elektrickou vodivost ECC s NP díky tunelovému vedení elektrického proudu. Díky těmto vlastnostem mají ECC s NP vysokou citlivost na tlak.



*Obr. 13: částice niklového prášku pořízené pomocí SEM s 10 µm měřítkem (vlevo) a 1 µm měřítkem (vpravo) [26]*

ECC s niklovým práškem vykazují vyšší citlivost na tlakové zatížení při aplikaci jako senzory, než ECC na bázi CF, GP, CB, CNT, SF a SS [3].



### 2.4.11 Ocelářenská struska

Ocelářenská struska (steel slag, SS) je vedlejším produktem průmyslové výroby oceli, který je získáván během výroby oceli v elektrické peci [22]. Podle způsobu chlazení roztavené SS můžeme SS rozdělit do pěti skupin s různými vlastnostmi: přirozeně vzduchem chlazenou SS, vodou sprejovanou SS, vodou prudce chlazenou (kalenou) SS, vzduchem prudce chlazenou (kalenou) SS a v mělkém boxu chlazenou SS.

SS obsahují často vysoká množství oxidů železa  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  a  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , které mají dobré elektrické vlastnosti (vysokou měrnou elektrickou vodivost srovnatelnou s uhlíkovými vlákny viz kapitola 2.3.4) [3], [22]. Výsledkem toho může být vysoká měrná elektrická vodivost SS. Kromě toho může SS nahradit přírodní kamenivo, čímž se sníží zatížení životního prostředí a spotřeba přírodních zdrojů. SS můžeme použít jako kamenivo i jako elektricky vodivou příměs, proto je její využití v elektricky vodivých betonech výhodné.

Použití SS jako kameniva je dobré, protože má dobré mechanické vlastnosti, které zahrnují velkou pevnost a odolnost (také proti oděru a nárazům) [22]. Částice SS mají hrubě pórovitou strukturu s propojenými buňkami, díky čemuž má SS větší měrný povrch, než jemnější materiály (viz *Obr. 14*), což způsobuje dobré spojení s pojivovou fází betonu. SS s průměry zrn mezi (0,315–5) mm lze použít také pro výrobu senzorů tlaku.



*Obr. 14: Ocelářenská struska [22]*

## 2.5 Elektricky nevodivé příměsi do betonových matric a jejich využití

### 2.5.1 Příměsi k opravě trhlin

Pro vyplňování trhlin v betonech při jejich vzniku za účelem zabránění ztráty jejich pevnosti mohou být použita vosková vlákna plněná metylmetakrylátem, který se při vzniku trhliny z vlákna uvolní, v trhlíně polymerizuje a zaplní ji [27]. Tím se více sníží ztráta pevnosti způsobená trhlínami, než při aplikaci metylmetakrylátu na povrch trhliny. K vyplňování mikrotrhlin je vhodné použití skleněných vláken místo voskových vláken.

## 2.5.2 Materiály s fázovou přeměnou – PCM

Betony s přísávkami materiálů s fázovou přeměnou (PCM) se používají ke snížení spotřeby energie na vytápění staveb. PCM při svém tání uchovává teplo ve formě energie fázové přeměny, toto teplo je v případě poklesu teploty pod teplotu tání následně uvolněno [28]. Přísávkami zapouzdřených mikročásteček PCM do betonu při koncentraci mohou snižovat výslednou pevnost v tlaku, tažnost a hustotu betonu i při 5 mh. %. U PCM do betonové matrice je požadována teplota tání blízká teplotě interiéru stavby a co nejvyšší měrné skupenské teplo (entalpie) tání. V praxi se jako PCM často používá například mikroenkapsulovaný parafin (zapouzdřené mikročástečky vosku). Výhodou jeho použití je také výrazné snížení měrné tepelné vodivosti výsledného betonu a následně úspora energie potřebná k vytápění. Alternativou je makroenkapsulovaný parafin, jehož použitím bylo dosaženo zvýšení tažnosti, menšího snížení pevnosti v tlaku, ale bohužel také zvýšení měrné tepelné vodivosti betonu. Tepelné vlastnosti PCM byly zkoumány v různých studiích [8].

## 2.6 Vyhodnocení dielektrických vlastností

Ke stanovení elektrických a dielektrických vlastností AAA se využívá impedanční spektroskopie (IS) [5]. Impedance  $Z$  je vyjádřena komplexním číslem sestávajícím z reálné složky (rezistance,  $R$ ) a imaginární složky (reaktance,  $X$ ) dle vztahu

$$Z = R + iX, \quad (6)$$

kde  $i$  je imaginární jednotka.  $Z$  velikosti impedance  $|Z|$  a fázového posunu mezi napětím a proudem ( $\varphi$ ) lze stanovit rezistanci a reaktanci použitím vztahů

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}, \tan \varphi = X / R. \quad (7)$$

Z těchto vztahů lze pro  $R$  a  $X$  odvodit vztahy [5], [29]

$$R = |Z| \cos \varphi \text{ a } X = |Z| \sin \varphi. \quad (8)$$

Získané hodnoty veličin lze dvourozměrně zobrazit v Cole-Cole diagramu závislosti reaktance na rezistanci, nebo Bodeově grafu závislosti  $|Z|$  a  $\varphi$  na frekvenci [5]. Závislosti rezistance a reaktance na frekvenci lze také zobrazit trojrozměrně jednou křivkou.

Naměřená impedanční spektra jsou často interpretována hledáním co nejjednodušších ekvivalentních obvodů, které dobře odpovídají chování měřených vzorků [5]. Tyto ekvivalentní obvody jsou tvořeny prvky používanými v elektrotechnice nebo v elektrochemii.

V případě elektrotechnických prvků se jedná o rezistor ( $R$  s elektrickým odporem  $R$ ), kondenzátor ( $C$  s elektrickou kapacitou  $C$ ) nebo cívku ( $L$  s elektrickou indukčností  $L$ ), dále pro systémy s elektrolyty můžeme použít člen konstantního fázového posunu (constant phase element, CPE), Warburgovu impedanci  $Z_W$  (s fázovým posunem  $45^\circ$ ), tangenciální člen  $Z_O$  nebo Gerisherovu impedanci  $Z_G$  (viz Tabulka 3) [5].

Impedance členu konstantního fázového posunu  $Z_{CPE} = 1/Y_0(i\omega)^n$  přechází pro  $n = -1$  v impedanci cívky  $Z_L = i\omega L$  ( $Y_0 = 1/L$ ), pro  $n = 0$  v impedanci rezistoru  $Z_R = R$  ( $Y_0 = 1/R$ ), pro  $n = 0,5$  ve Warburgovu impedanci  $Z_W = 1/Y_0 \sqrt{i\omega}$  a pro  $n = 1$  v impedanci kondenzátoru  $Z_C = -i\omega C$  ( $Y_0 = C$ ). Zde je  $Y_0$  admittance (obrácená hodnota impedance) při jednotkové frekvenci,  $n$  parametr členu konstantního fázového posunu (CPE parametr),  $L$  indukčnost cívky,  $R$  odpor rezistoru a  $C$  elektrická kapacita kondenzátoru.

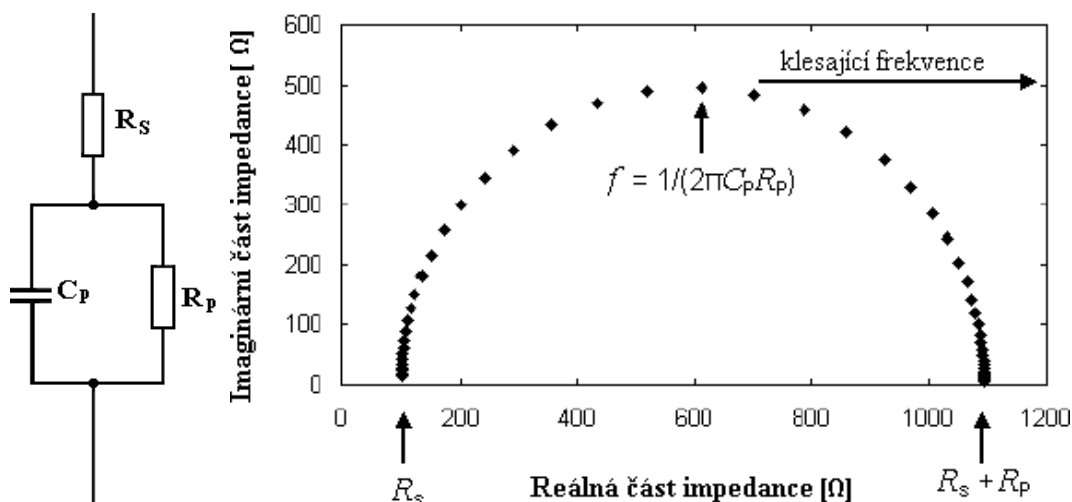


CPE tak zobecňuje procesy elektrické indukce (například v cívkách), vedení proudu (například rezistory) a uchovávání elektrického náboje (například v kondenzátorech) a proto jej lze využít pro popis neideálnosti chování elektrických součástek. Modifikacemi  $Z_{CPE}$  jsou tangenciální člen  $Z_O$  a Gerisherova impedance  $Z_G$ .

Tabulka 3: Prvky ekvivalentních obvodů a jejich impedance [5]

Název prvku	Vztah pro výpočet impedance prvku
rezistor, $R$	$Z_R = R$
kondenzátor, $C$	$Z_C = \frac{-i}{\omega C}$
cívka, $L$	$Z_L = i\omega L$
člen konstantního fázového posunu, CPE	$Z_{CPE} = \frac{1}{Y_0(i\omega)^n}$
Warburgova impedance, $Z_W$	$Z_W = \frac{1}{Y_0\sqrt{i\omega}}$
tangenciální člen, $Z_O$	$Z_O = \frac{\tanh(B\sqrt{i\omega})}{Y_0\sqrt{i\omega}}$
Gerisherova impedance, $Z_G$	$Z_G = \frac{1}{Y_0\sqrt{k_a + i\omega}}$

Jako ekvivalentní obvod pro elektrochemickou impedanční spektroskopii (EIS) je často používána Randlesova cela skládající se z paralelního kondenzátoru ( $C_p$ ), paralelního rezistoru  $R_p$  a sériového rezistoru  $R_s$  (viz Obr. 15 vlevo) [5]. Cole-Cole diagram pro Randlesovu celu tvoří půlkruh, ve kterém se impedance při dostatečně nízkých frekvencích  $f$  blíží součtu sériového odporu  $R_s$  a paralelního odporu  $R_p$  a při dostatečně vysokých  $f$  se blíží  $R_s$  (viz Obr. 15 vpravo).



Obr. 15: Schéma Randlesovy cely (vlevo) a Cole-Cole diagram pro Randlesovu celu (vpravo),  $R_s$  je sériový rezistor (elektrický odpor),  $C_p$  paralelní kondenzátor (elektrická kapacita) a  $R_p$  paralelní rezistor (elektrický odpor) [5]

Pro popis impedančních spekter paralelních obvodů se obvykle používá místo impedance admitance (elektrická vodivost pro střídavý proud), která je dána vztahem

$$Y = G + iB, \quad (9)$$

kde  $G$  je konduktance (reálná, frekvenčně nezávislá část admitance) a  $B$  je susceptance (imaginární, frekvenčně závislá část admitance) [29].

Velikost admitance a fázový posun jsou dány vztahy

$$|Y| = \sqrt{G^2 + B^2}, \quad \varphi = -\arctan \frac{B}{G}, \quad (10)$$

pro  $G$  a  $B$  tak lze odvodit

$$G = |Y| \cos -\varphi, \quad B = |Y| \sin -\varphi. \quad (11)$$

Přepočítání mezi impedancí a admitancí lze provést pomocí vztahů

$$Y = G_p + iB_p = \frac{1}{Z} = \frac{1}{R_s + iX_s} = \frac{R_s}{R_s^2 + X_s^2} - i \frac{X_s}{R_s^2 + X_s^2} \quad (12)$$

$$Z = R_s + iX_s = \frac{1}{Y} = \frac{1}{G_p + iB_p} = \frac{G_p}{G_p^2 + B_p^2} - i \frac{B_p}{G_p^2 + B_p^2} \quad (13)$$

$$D_z = \frac{R_s}{X_s} = \frac{G_p}{B_p}, \quad (14)$$

kde  $G_p$  je paralelní konduktance,  $B_p$  je paralelní susceptance,  $R_s$  je sériová rezistance,  $X_s$  je sériová reaktance a  $D_z$  je ztrátový faktor. Z těchto vztahů lze odvodit

$$R_s = \frac{G_p}{G_p^2 + B_p^2} \Rightarrow R_s = \frac{R_p D_z^2}{1 + D_z^2} \quad (15)$$

$$G_p = \frac{R_s}{R_s^2 + X_s^2} \Rightarrow R_p = R_s \left( 1 + \frac{1}{D_z^2} \right) \quad (16)$$

$$X_s = \frac{-B_p}{G_p^2 + B_p^2} \Rightarrow X_s = \frac{X_p}{1 + D_z^2}, \quad (17)$$

$$B_p = \frac{-X_s}{R_s^2 + X_s^2} \Rightarrow X_p = X_s (1 + D_z^2), \quad (18)$$

kde  $R_p$  je paralelní rezistance a  $X_p$  paralelní reaktance [29].

Impedanční spektroskopie (IS) systémů s probíhajícími elektrochemickými reakcemi se nazývá elektrochemická impedanční spektroskopie (EIS) [5]. EIS poskytuje komplexní informace o elektrochemickém chování měřeného elektrochemického systému a také o kinetice a mechanismu elektrodových dějů, což se využívá například při odhalování koroze.

Pro elektrodový potenciál redoxního páru v elektrochemických systémech platí Nernstova rovnice

$$E = E_0 + \frac{R_m T}{Z_{el} F} \ln \frac{a_{ox}}{a_{red}}, \quad (19)$$

kde  $E_0$  je standardní elektrodový potenciál redoxního páru,  $Z_{el}$  počet přenášených elektronů při reakci,  $a_{ox}$  a  $a_{red}$  aktivity oxidované a redukované formy látky, které je možné aproximovat jejich koncentracemi.

## 2.7 Vyhodnocení tepelných vlastností

Pro vyhodnocení tepelných vlastností AAA lze využít Carlslaw-Jaegerův matematický model v zobecněné podobě pro reálný zdroj tepla s definovaným výkonem a nezanedbatelnými ztrátami [6–11]. Teplotní odezva při zahřívání v tomto modelu popsána rovnicemi

$$\Delta T(t) = A t^\alpha \exp\left(-\frac{h^2}{4at} - \frac{4at}{R_z^2}\right), \text{ resp. } \Delta T(t) = \Delta T_0 (t/t_D)^\alpha \exp\left[-\left(\frac{t_D}{t} + \frac{t}{t_R}\right)\right], \quad (20)$$

kde  $\Delta T_0 = A t_D^\alpha$  je rozdíl teplot ve stacionárním (ustáleném) stavu,  $A$  je koeficient tepelné absorpce,  $t_D = h^2/4a$  je difuzní čas ( $h$  je vzdálenost teplotního senzoru od zdroje tepla a  $a$  je teplotní vodivost),  $t_R = R_z^2/4a$  je relaxační čas ( $R_z$  je parametr tepelných ztrát, který musí být větší, než průměr zdroje tepla). Poměr relaxačního a difuzního času  $t_R/t_D = R^2/h^2$  pak charakterizuje podíl tepelných ztrát na měřené teplotní odezvě. Hodnota  $\alpha = \alpha_0 + (D - E)/2$  charakterizuje vlastnosti tepelného zdroje,  $E$  je zde dimenze prostoru, ve kterém se šíří teplo, (pro objemové šíření je  $E = 3$ ),  $D$  je dimenze zdroje tepla ( $D = 0, 1, 2, 3$  postupně pro bodový, lineární, plošný a objemový zdroj tepla)  $\alpha_0$  je hodnota definující typ ohřevu ( $\alpha_0 = 0, 1, 2$  postupně pro pulzní, schodový a lineární ohřev). V případě schodového ohřevu a plošného tepelného zdroje je  $\alpha = 1/2$ .

**Měrná tepelná vodivost**  $\lambda$  je termofyzikální veličina definující schopnost materiálu šířit teplo vedením (vyjadřuje množství tepla, protékající za jednotkový čas jednotkovým průřezem materiálu s jednotkovým teplotním gradientem). Je dána Fourierovým zákonem

$$q = -\lambda \text{grad } T, \quad (21)$$

kde  $q = P/S$  je plošná hustota tepelného toku ( $P = UI$  je příkon tepelného zdroje,  $S$  je jeho plocha) a  $\text{grad} T = (\partial T/\partial x, \partial T/\partial y, \partial T/\partial z)$  je teplotní gradient v daném místě. Pro teplotní gradient můžeme použít pro vedení tepla jedním směrem zjednodušení  $\text{grad } T = \Delta T/h$ . Měrnou tepelnou vodivost pak můžeme vyjádřit jako [6–11]

$$\lambda = \frac{P}{\Delta T} \frac{h}{S}. \quad (22)$$

**Měrná tepelná kapacita**  $c$  je definována rovnicí

$$c = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT}, \quad (23)$$

kde  $dQ = P dt$  je velikost tepla potřebného k ohřátí materiálu o teplotu  $dT$  a  $m = h\rho_m S$  je hmotnost měřeného vzorku,  $S$  je velikost průřezu a  $\rho_m$  je hustota materiálu. Jednotkou měrné tepelné kapacity v soustavě SI je proto  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . Speciálními případy  $c$  jsou měrná tepelná kapacita měřená za konstantního tlaku  $c_p$  a měrná tepelná kapacita měřená za konstantního objemu  $c_v$ ,  $c_p$  můžeme také vyjádřit rovnicí

$$c_p = \frac{P dt}{m dT}. \quad (24)$$

Vztahy mezi **teplotní vodivostí**  $a$ , měrnou tepelnou vodivostí  $\lambda$  a měrnou tepelnou kapacitou za konstantního tlaku  $c_p$  jsou popsány rovnicemi [6–11]

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho} = h^2 \frac{d \ln \Delta T}{dt} = \frac{h^2}{4t_D}. \quad (25)$$

Tepelné parametry mohou být určeny **diferenciální metodou**, využívající časovou odezvu teplotního rozdílu vztaženého k teplotě zdroje  $\Delta T$  pro definovaný pulz dodaného tepla [8–11]. Následně je z teplotní odezvy stanovena pomocí výše uvedených vztahů (22) a (24) závislost měrné tepelné konduktance  $\lambda$  na měrné tepelné kapacitě za konstantního tlaku  $c_p$ . Pomocí horizontálních a vertikálních asymptot závislosti  $c_p = f(\lambda)$  jsou potom určeny velikosti měrných tepelných vodivostí, měrných tepelných kapacit a teplotních vodivostí měřených materiálů.

## 2.8 Vyhodnocení struktury elektricky vodivých betonů

Pro stanovení druhů a koncentrací krystalických fází a pro stanovení koncentrace amorfni skelné fáze aluminosilikátů lze využít rentgenovou difrakční spektroskopii (X-ray diffraction spectroscopy, XRD) [30], infračervenou spektroskopii s Fourierovou transformací (Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR) [31], nebo Ramanovu spektroskopii. Kvalitativní analýza distribuce velikosti segmentů amorfni skelné fáze elektricky vodivých betonů (ECC) prostřednictvím XRD je nepřesná a možná jen dekonvolucí XRD spekter. Současné použití dvou nebo tří těchto spektroskopických metod přináší lepší a komplexnější výsledky, než použití jedné metody.

Koncentrace vazebných a nevazebných atomů kyslíku v N-A-S-H, nebo C-A-S-H gelu (směsi  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$ ) AAA je možné stanovit pomocí nukleární magnetické rezonance pod magickým úhlem (magic-angle spinning nuclear magnetic resonance, MAS-NMR) [15].

Pro analýzu mikrostruktury povrchu AAA se používá například skenovací elektronová mikroskopie (SEM) [15].

Pro analýzu koncentrace jednotlivých prvků v AAA se používá rentgenová fluorescenční spektroskopie (X-ray fluorescence spectroscopy, XRF) [32]. Tato metoda umožňuje sledování koncentrací prvků v různých částech vzorku v závislosti na čase.

Pro určení distribuce pórů o různých velikostech se používá rtuťová porozimetrie (mercury intrusion porosimetry, MIP) [32]. Tato metoda spočívá ve vtlačování rtuti do pórů vzorku, při zvyšování tlaku rtuti jsou póry postupně zaplňovány od největších pórů, po nejmenší.

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

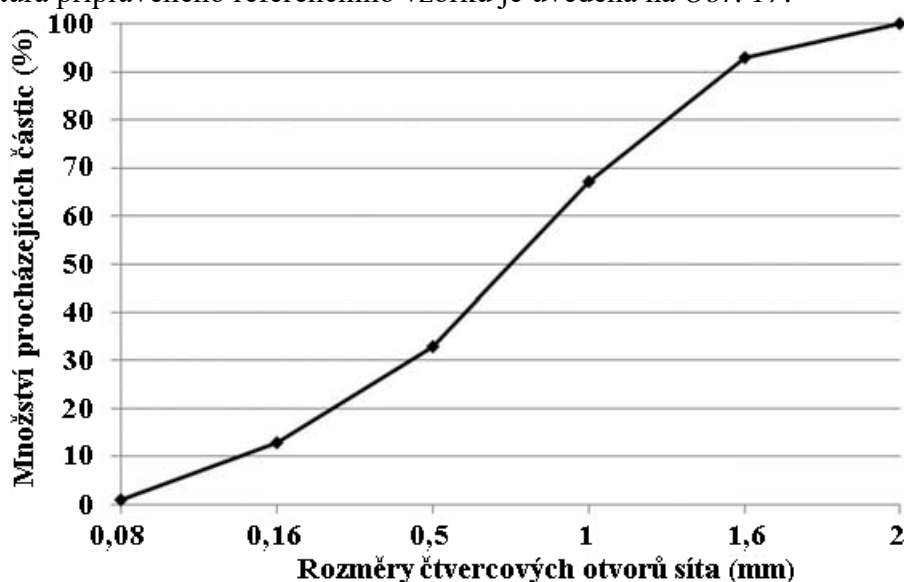
Tato část práce se zabývá přípravou vzorků alkalicky aktivovaných aluminosilikátů s uhlíkovými příměsemi, dále vlastnostmi vzorků těchto materiálů připravených popsanou metodou v jiných studiích a nakonec použitými metodami charakterizace připravených vzorků z hlediska jejich optických, elektrických, dielektrických a tepelných vlastností.

#### 3.1 Příprava vzorků

##### 3.1.1 Obecný postup pro referenční vzorek

Referenční vzorek a série vzorků alkalicky aktivovaných aluminosilikátů (AAA) s uhlíkovými sazemí (CB), grafitovým práškem (GP) a uhlíkovými vlákny (CF) s rozměry přibližně  $(4 \times 4 \times 1) \text{ cm}^3$  nebo  $(4 \times 4 \times 2,25) \text{ cm}^3$  byly připraveny smícháním tří 450 g frakcí křemenného písku se zrnitostmi PG1, PG2 a PG3 vyrobených ve firmě Filtrační písky, Ltd. dle požadavků normy ČSN EN 196-1, 450 g vysokopecní strusky SMŠ 380 s měrným povrchem  $380 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$  (viz Tabulka 4) vyrobené ve firmě Kotouč Štramberk s. r. o. splňující požadavky dle normy ČSN EN 197-1 [33], 90 g sodného vodního skla SUSIL MP 2.0 s látkovým poměrem  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  2,07 0, příslušného množství vodní suspenze elektricky vodivé uhlíkové příměsi s dispergátorem TRITON X-100 [35] a vody [36]. Distribuce velikosti částic všech frakcí písku je uvedena na Obr. 16. Výroba těchto vzorků byla uskutečněna na Fakultě stavební Českého vysokého učení technického v Praze.

Při přípravě vzorků byla nejprve smíchána voda s vodním sklem, následně byla do roztoku přimíchána suspenze vodivé příměsi, potom byly přimíchávány další složky v pořadí: zbytek přidávané vody, vysokopecní struska SMŠ 380, jemná frakce písku (PG1), středně hrubá frakce písku (PG2) a hrubá frakce písku (PG3) [36]. Finální směsi byly potom odlity do hranatých forem o rozměrech  $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$ , vystaveny vibracím, po 24 hodinách byly vyjmuty z forem, ponechány 28 dní ve vodě, vysušeny v peci a rozřezány do požadovaných rozměrů. Mikrostruktura připraveného referenčního vzorku je uvedena na Obr. 17.

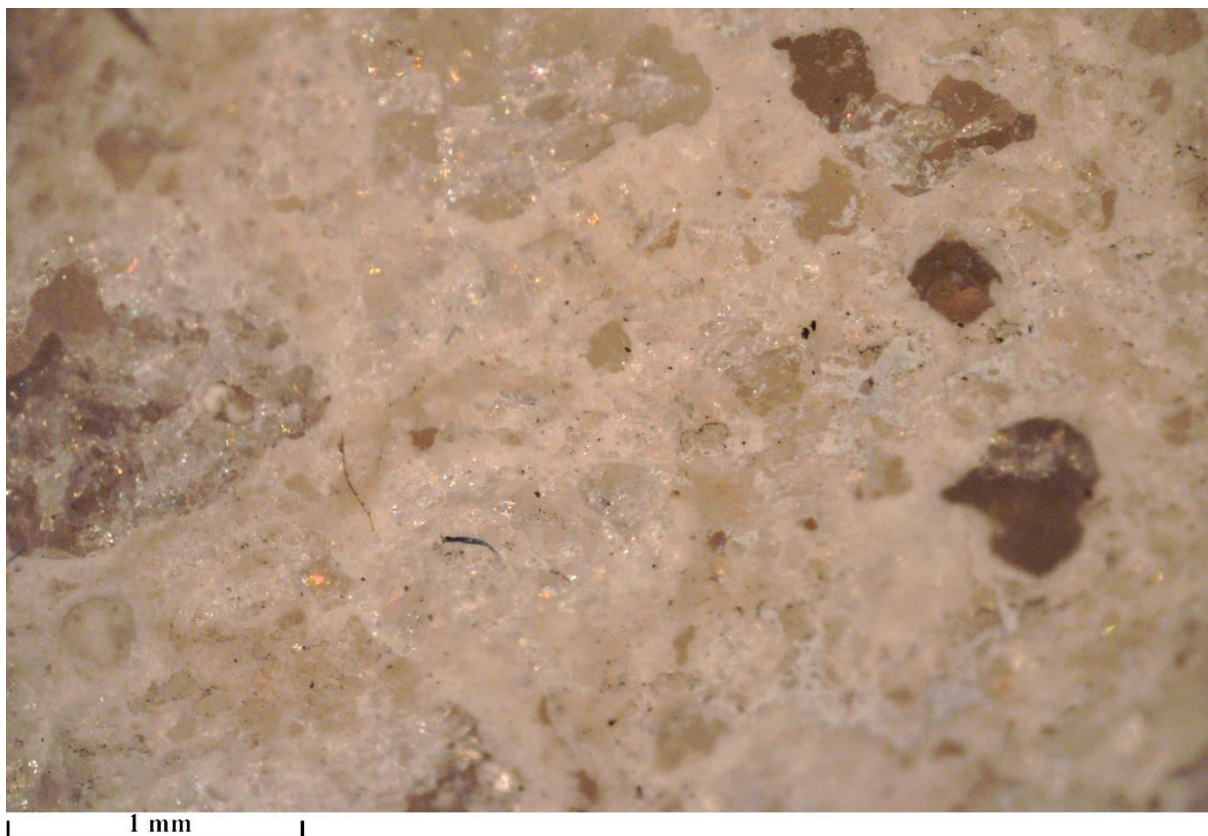


Obr. 16: Integrovaná distribuční křivka Chlumského písku [36]

Tabulka 4: Hmotnostní složení vysokopecní strusky SMS 380 použité k výrobě vzorků

Složka	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	Cl
Obsah [%]	39,66	0,47	6,45	40,12	9,50	0,72	0,33	0,55	0,65	0,05

Na mikrofotografii připraveného referenčního vzorku pro sérii vzorků AAA s CB, GP, CF na Obr. 17 jsou vidět zrna křemenného písku a také různé mikrokrystaly v amorfní aluminosilikátové fázi (AF).

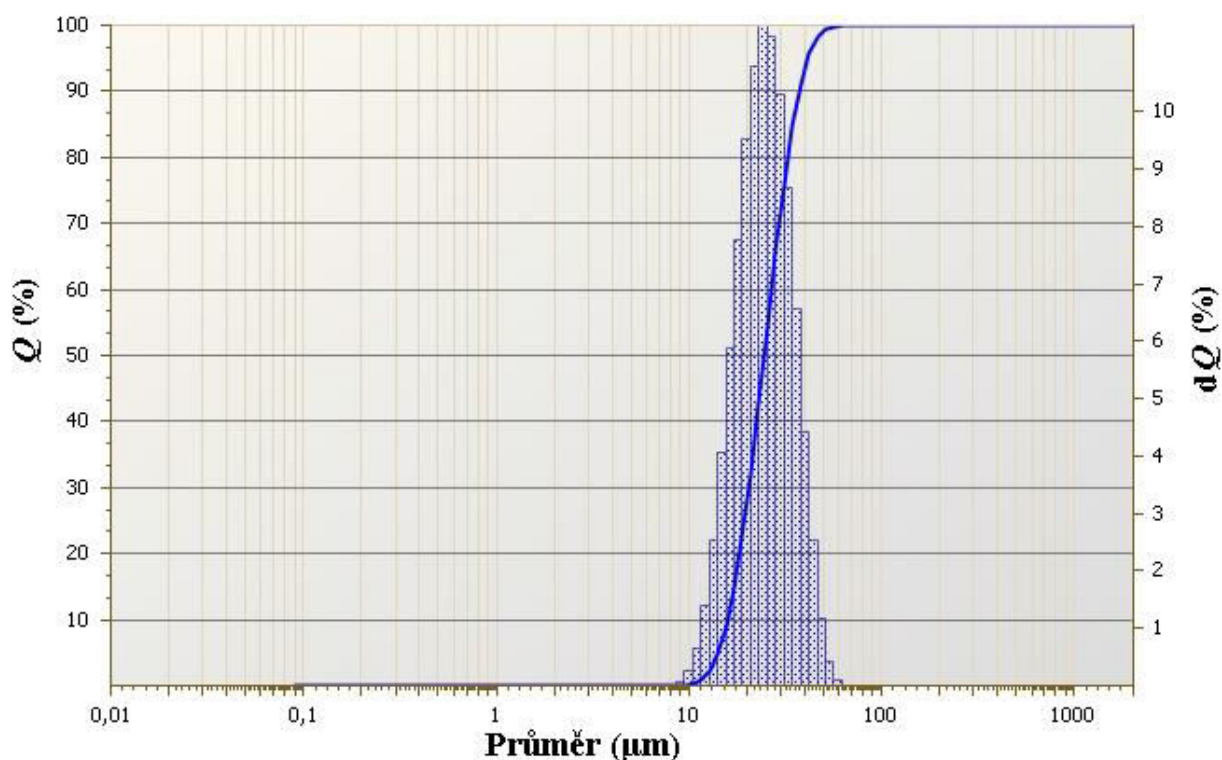


Obr. 17: Povrch alkalicky aktivovaného aluminosilikátu (AAA) – referenčního vzorku pro sérii vzorků s uhlíkovými sazemí (CB), grafitovým práškem (GP) a uhlíkovými vlákny (CF)

### 3.1.2 Vzorky s uhlíkovými sazemí

Vzorky AAA s CB byly připraveny přidáním 1% nebo 20% suspenze CB vyrobených ve firmě CS CABOT, spol. s r.o do výchozí směsi pro referenční vzorek. 1% suspenze měla poměr hmotností CB a TRITONU X-100 10:1 a 20% suspenze 12,5:1.

Na Obr. 18 jsou uvedeny diferenciální a integrální distribuční křivky velikostí částic CB. Diferenciální distribuční křivka je závislostí hmotnostního podílu částic na jejich průměru, zatímco integrální distribuční křivka je závislostí hmotnostního podílu částic dosahujících daného průměru na průměru částic. Polovina částic dosahovala průměru  $(25 \pm 2) \mu\text{m}$ , při kterém bylo i maximum koncentrace částic v diferenciální distribuční křivce.



Obr. 18: Diferenciální ( $dQ$ ) a integrální ( $Q$ ) distribuční křivky velikostí částic CB naměřené ve firmě FRITSCH GmbH

Byly připraveny dvě série vzorků CB – první pro různé tloušťky vzorků a druhá pro různé koncentrace CB v aluminosilikátové fázi. Byly změřeny rozměry a hmotnosti všech vzorků obou sérií (společně s dalšími použitými vzorky). Složení výchozích směsí a parametry těchto vzorků jsou uvedeny v tabulkách (Tabulka 5 a Tabulka 6). Hm. % CB zde znamená hmotnostní koncentraci CB v aluminosilikátové fázi (AF),  $w/c$  poměr hmotností přidané vody a strusky do výchozí směsi,  $sd$  rozměr čtvercové podstavy vzorku,  $h$  tloušťka vzorku a  $\rho_v$  objemová hmotnost (zdánlivá hustota) vzorku, totéž platí i pro parametry ostatních vzorků v následujících tabulkách (Tabulka 7 až Tabulka 11). Objemová hmotnost je definována jako hmotnost materiálu dělená součtem objemu materiálu a objemu pórů v materiálu případně mezer mezi částicemi materiálu. Oproti hustotě materiálu  $\rho_m$ , která je poměrem hmotnosti a objemu materiálu tak má nižší hodnotu.

Tabulka 5: Parametry první řady vyrobených vzorků AAA s CB v závislosti na tloušťce vzorků pro různé hmotnostní koncentrace CB

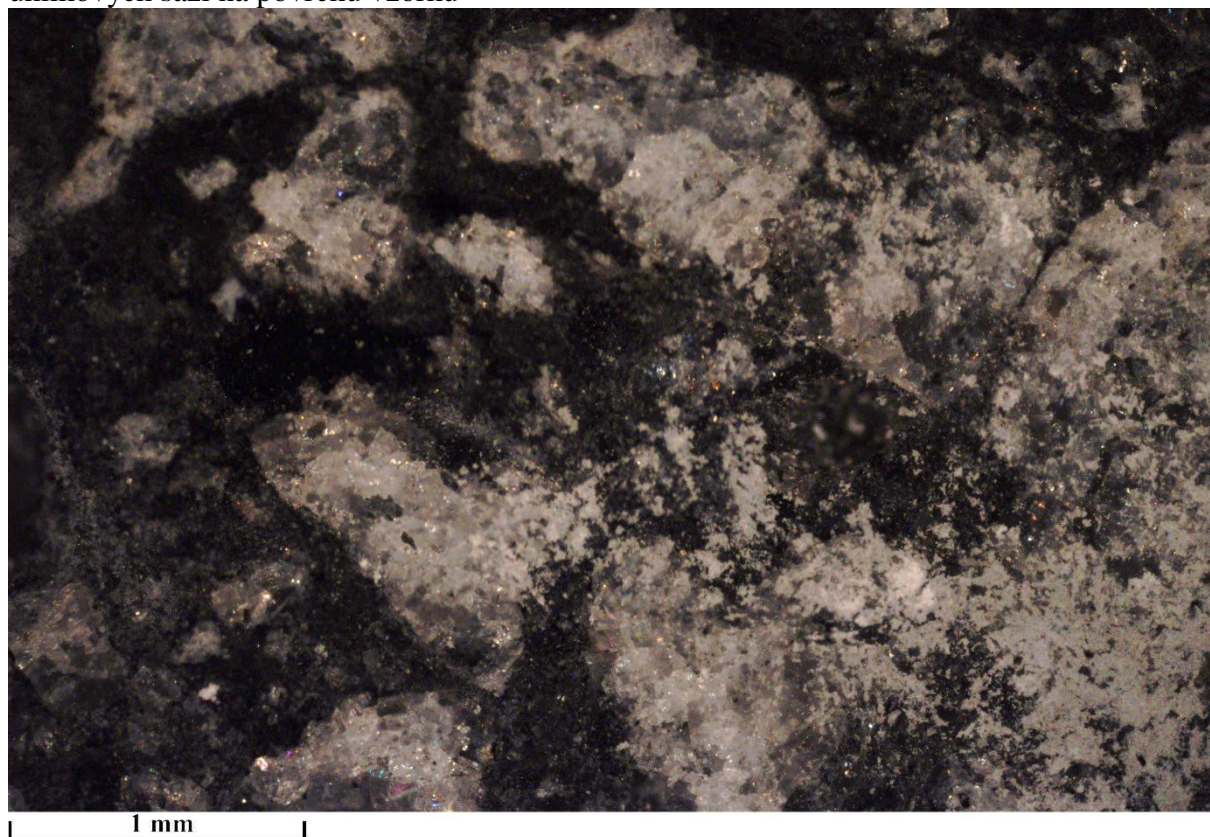
Hm. % CB	0,33	0,33	0,33	0,44	0,44	0,44
1% suspenze (g)	150	150	150	200	200	200
přidaná voda (g)	50	50	50	0	0	0
$w/c$	0,4411	0,4411	0,4411	0,4400	0,4400	0,4400
rozměry $sd$ (cm)	4	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1
tloušťka $h$ (cm)	1,3	1,4	2,4	1,15	1,2	2,3
hmotnost (g)	41,33	44,03	77,84	35,39	36,68	71,62
$\rho_v$ (g·cm <sup>-3</sup> )	1,9870	1,8709	1,9294	1,8307	1,8184	1,8524



Tabulka 6: Parametry druhé řady vzorků AAA s CB v závislosti na hmotnostní koncentraci CB

Hm. % CB	0	0,89	4,44	6,66	8,89
Suspenze CB	–	20%	20%	20%	20%
<i>m</i> suspenze (g)	0	20	100	150	200
přidaná voda (g)	200	190	130	90	55
<i>w/c</i>	0,4444	0,4578	0,4667	0,4667	0,4778
rozměry <i>sd</i> (cm)	4	4	4,1	4,	4,1
tloušťka <i>h</i> (cm)	1	1,05	1,1	1,1	1
hmotnost (g)	38,5	32,59	33,92	31,04	32,14
$\rho_v$ (g·cm <sup>-3</sup> )	2,4063	1,9399	1,8344	1,7636	1,9120

Na mikrofotografii připraveného vzorku s 6,67 % CB v AF na Obr. 19 jsou vidět agregáty uhlíkových sazí na povrchu vzorku

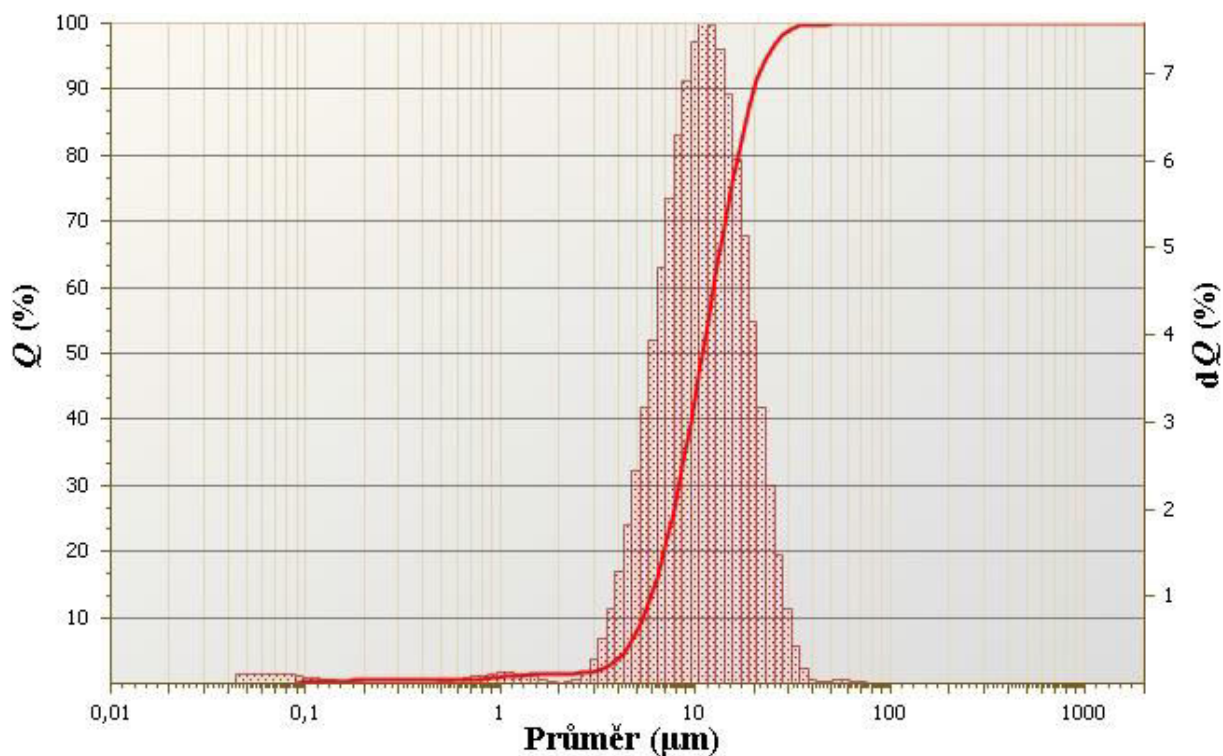


Obr. 19: Povrch vzorku alkalicky aktivovaného aluminosilikátu (AAA) s 6,67 % uhlíkových sazí (CB) v aluminosilikátové fázi (AF)

### 3.1.3 Vzorky s grafitovým práškem

Vzorky AAA s GP byly připraveny přidáním 1%, 10 % nebo 20% suspenze GP do standardní směsi pro referenční vzorek. 1% suspenze GP měla poměr hmotnostních koncentrací GP a dispergátoru TRITON X-100 10:1, 10% suspenze GP 20:1 a 20% suspenze GP 40:1. Diferenciální a integrální distribuční křivky velikostí částic GP jsou uvedeny na Obr. 20. Polovina částic dosahovala průměru  $(11 \pm 2) \mu\text{m}$ , při kterém bylo i maximum koncentrace částic v diferenciální distribuční křivce. Informace o složení směsí, ze kterých byly tyto vzorky AAA připraveny a o parametrech těchto vzorků jsou uvedeny v následujících tabulkách (Tabulka 7 a Tabulka 8).





Obr. 20: Diferenciální ( $dQ$ ) a integrální ( $Q$ ) distribuční křivky velikostí částic GP naměřené ve firmě FRITSCH GmbH

Tabulka 7: Parametry první řady vzorků AAA s GP v závislosti na tloušťce vzorků pro různé hmotnostní koncentrace GP

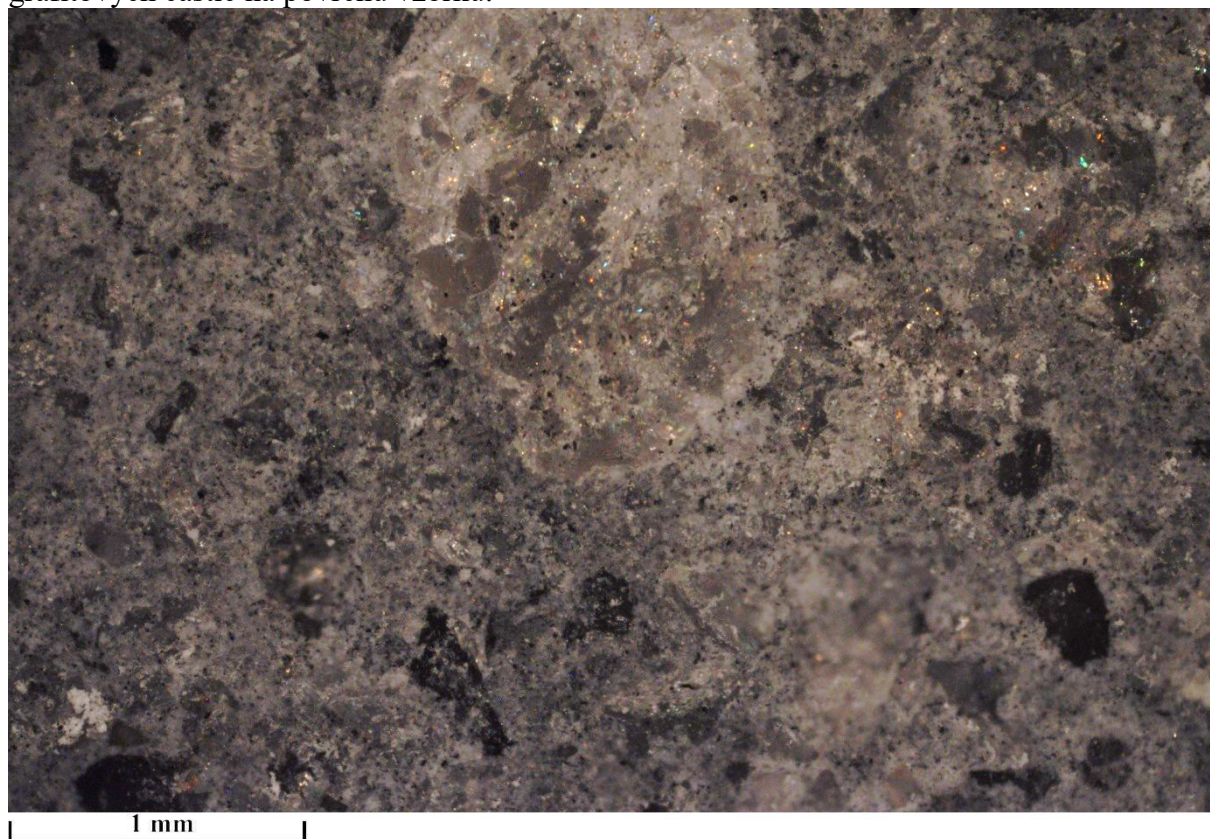
Hm. % GP	0,33	0,33	0,33	0,44	0,44	0,44
1% suspenze (g)	150	150	150	200	200	200
přidaná voda (g)	50	50	50	0	0	0
$w/c$	0,4411	0,4411	0,4411	0,4400	0,4400	0,4400
rozměry $sd$ (cm)	4,1	4,05	4	4	4	4
tloušťka $h$ (cm)	1,1	1,1	2,3	1,3	1,2	2,4
hmotnost (g)	36,01	39,23	71,64	36,88	37,84	69,2
$\rho_v$ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	1,9474	2,1743	1,9467	1,7731	1,9708	1,8804

Tabulka 8: Parametry druhé řady vzorků AAA s GP v závislosti na hmotnostní koncentraci GP

Hm. % GP	0	0,89	1,11	1,78	2,22	2,67
suspenze GP	–	20%	10%	10%	20%	10%
$m$ suspenze (g)	0	20	50	80	50	120
přidaná voda (g)	200	190	160	140	170	100
$w/c$	0,4444	0,4667	0,4556	0,4711	0,4667	0,4622
rozměry $sd$ (cm)	4	4	4	3,9	3,9	4
tloušťka $h$ (cm)	1	0,9	1,05	1,1	0,9	1
hmotnost (g)	38,5	33,40	32,06	31,24	31,76	31,98
$\rho_v$ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	2,4063	2,3194	1,9083	1,8672	2,3201	1,9988

<b>Hm. % GP</b>	<b>3,33</b>	<b>4,44</b>	<b>6,67</b>	<b>8,89</b>
<b>suspenze GP</b>	10%	20%	20%	20%
<b>m suspenze (g)</b>	180	100	150	200
<b>přidaná voda (g)</b>	70	130	90	50
<b>w/c</b>	0,4556	0,4667	0,4667	0,4667
<b>rozměry sd (cm)</b>	3,9	4	4	4,1
<b>tloušťka h (cm)</b>	1	1	1,1	1,1
<b>hmotnost (g)</b>	31,86	32,65	32,04	33,74
<b><math>\rho_v</math> (g·cm<sup>-3</sup>)</b>	2,0947	2,0406	1,8205	1,8247

Na mikrofotografii připraveného vzorku s 4,44 % GP v AF na Obr. 21 jsou vidět agregáty grafitových částic na povrchu vzorku.



Obr. 21: Povrch vzorku alkalicky aktivovaného aluminosilikátu (AAA) s 4,44 % grafitového prášku (GP) v aluminosilikátové fázi (AF)

### 3.1.4 Vzorky s uhlíkovými vlákny

Vzorky AAA s uhlíkovými vlákny (CF) byly připraveny přidáním 1% suspenze CF do výchozí směsi. V 1% suspenzi CF a v 5% suspenzi CF byl poměr hmotnostních koncentrací uhlíkového přídatku a dispergátoru TRITON X-100 10:1. Informace o složení výchozích směsí pro přípravu vzorků a o parametrech připravených vzorků jsou uvedeny v následujících tabulkách (Tabulka 9 a Tabulka 10).

Tabulka 9: Parametry první řady vzorků AAA s CF v závislosti na tloušťce vzorků pro různé hmotnostní koncentrace

Hm. % GP	0,11	0,11	0,22	0,22	0,33	0,33
1% suspenze (g)	50	50	100	100	150	150
přidaná voda (g)	150	150	100	100	50	50
w/c	0,4433	0,4433	0,4422	0,4422	0,4411	0,4411
rozměry sd (cm)	4	4,1	4,1	4	4	4,1
tloušťka h (cm)	1,2	2,3	1,1	2,5	1,2	1,2
hmotnost (g)	35,29	70,55	31,23	72,01	35,44	36,80
$\rho_v$ (g·cm <sup>-3</sup> )	1,8380	1,8247	1,6889	1,8003	1,8458	1,8243

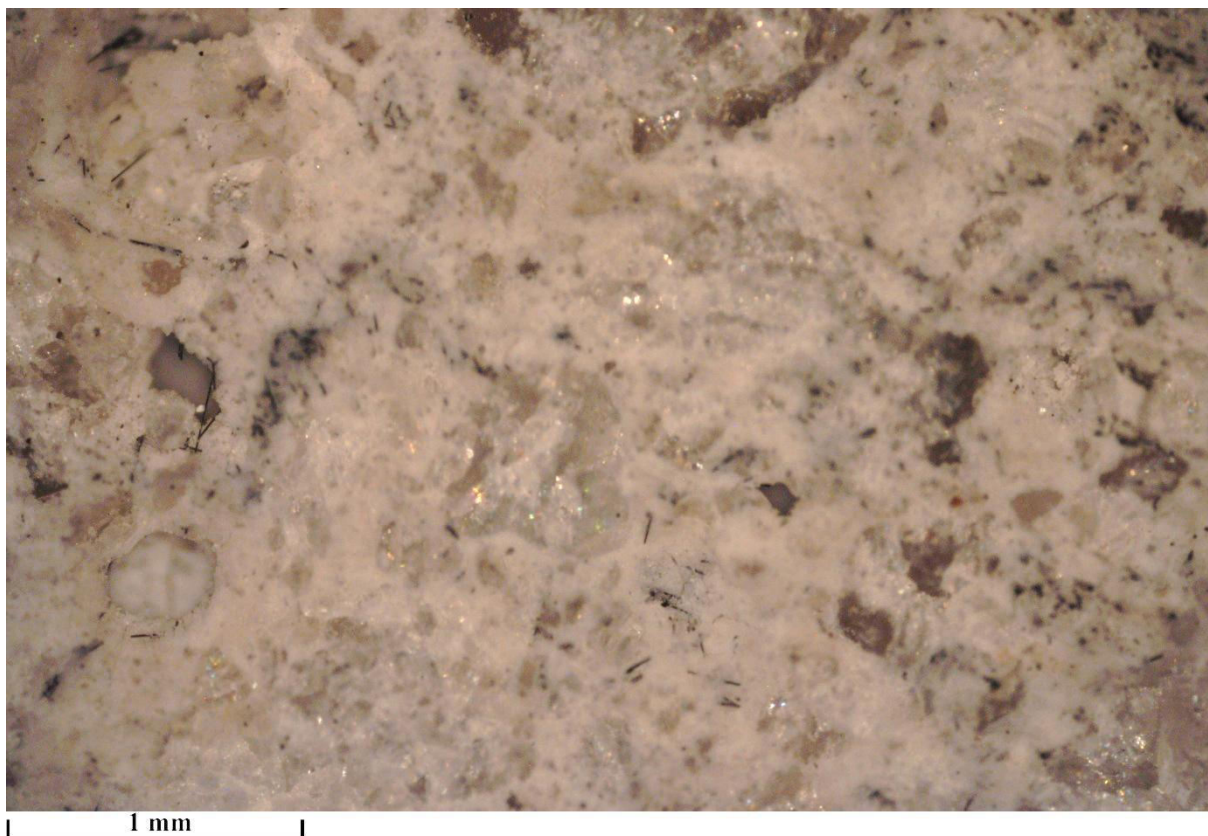
Hm. % GP	0,33	0,44	0,44	0,44
1% suspenze (g)	150	200	200	200
přidaná voda (g)	50	0	0	0
w/c	0,4411	0,4400	0,4400	0,4400
rozměry sd (cm)	4	4,1	4	4,1
tloušťka h (cm)	2,3	1,2	1,2	2,2
hmotnost (g)	64,95	32,72	34,31	62,05
$\rho_v$ (g·cm <sup>-3</sup> )	1,7649	1,6221	1,7870	1,6778

Tabulka 10: Parametry druhé řady vzorků AAA s CF v závislosti na hmotnostní koncentraci CF

Hm. % GP	0	0,56	1,11	1,67	2,22
5% suspenze (g)	0	50	100	150	200
přidaná voda (g)	200	150	100	50	0
w/c	0,4444	0,4389	0,4333	0,4278	0,4222
rozměry sd (cm)	4	4	4,1	4	4
tloušťka h (cm)	1	1	1,1	1,05	1
hmotnost (g)	38,5	31,34	32,89	33,51	32,48
$\rho_v$ (g·cm <sup>-3</sup> )	2,4063	1,9588	1,7787	1,9946	2,0300

Na mikrofotografii připraveného vzorku s 2,22 % CF v AF na Obr. 22 jsou vidět například vystupující uhlíková vlákna na povrchu vzorku, zrna písku a mikrokrystaly. Povrch tohoto vzorku se podobá povrchu referenčního vzorku.





*Obr. 22: Povrch vzorku alkalicky aktivovaného aluminosilikátu (AAA) s 2,22% CF v aluminosilikátové fázi (AF)*

### **3.1.5 Vzorky s CNT**

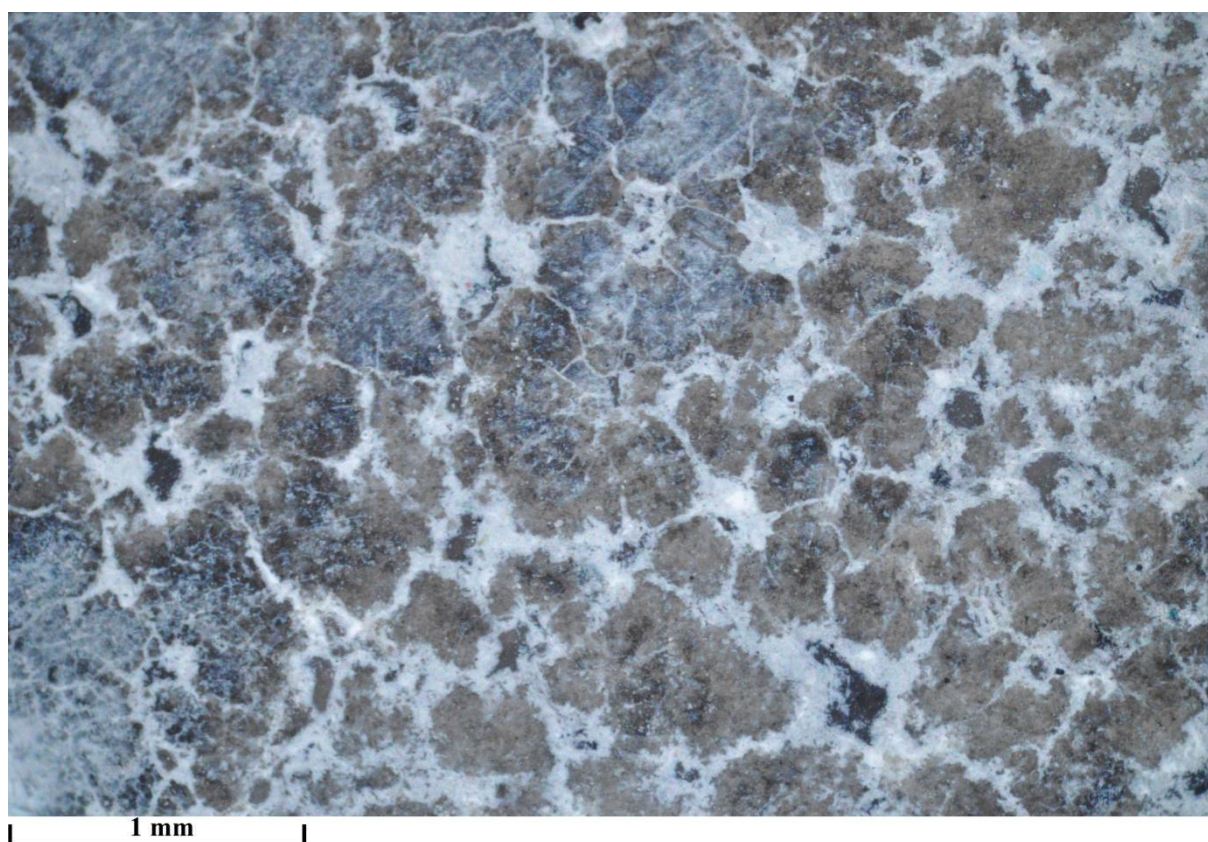
Referenční vzorek a vzorky AAA s uhlíkovými nanotrubičkami (CNT) s rozměry přibližně  $(3 \times 3 \times 1)$  cm byly vyrobeny smícháním 140 g písku se zrnitostí PG1, 140 g vysokopecní strusky SMS 380 vyrobené ve firmě Kotouč Štramberk s. r. o, 28 g sodného vodního skla SUSIL MP 2.0, vody a příslušného množství suspenze s CNT. Finální směsi byly dány do vody na 28 dní a následně rozřezány na vzorky. Tyto vzorky byly vyrobeny na Fakultě stavební Vysokého učení technického v Brně.

K přípravě byla použita 1% suspenze CNT z přípravku Graphistrength CW 2-45 (směsi 45 % pelet MWCNT a 55 % karboxymethylcelulózy) [37] a množství vody ve směsi bylo doplněno na 57 g. Díky tomu byl poměr hmotnosti vody a pojiva  $w/c \approx 0,4071$ . Parametry vzorků jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 11).

Tabulka 11: Parametry vyrobených vzorků alkalicky AAA CF v závislosti na hmotnostní koncentraci CNT (hm % CNT) v aluminosilikátové fázi

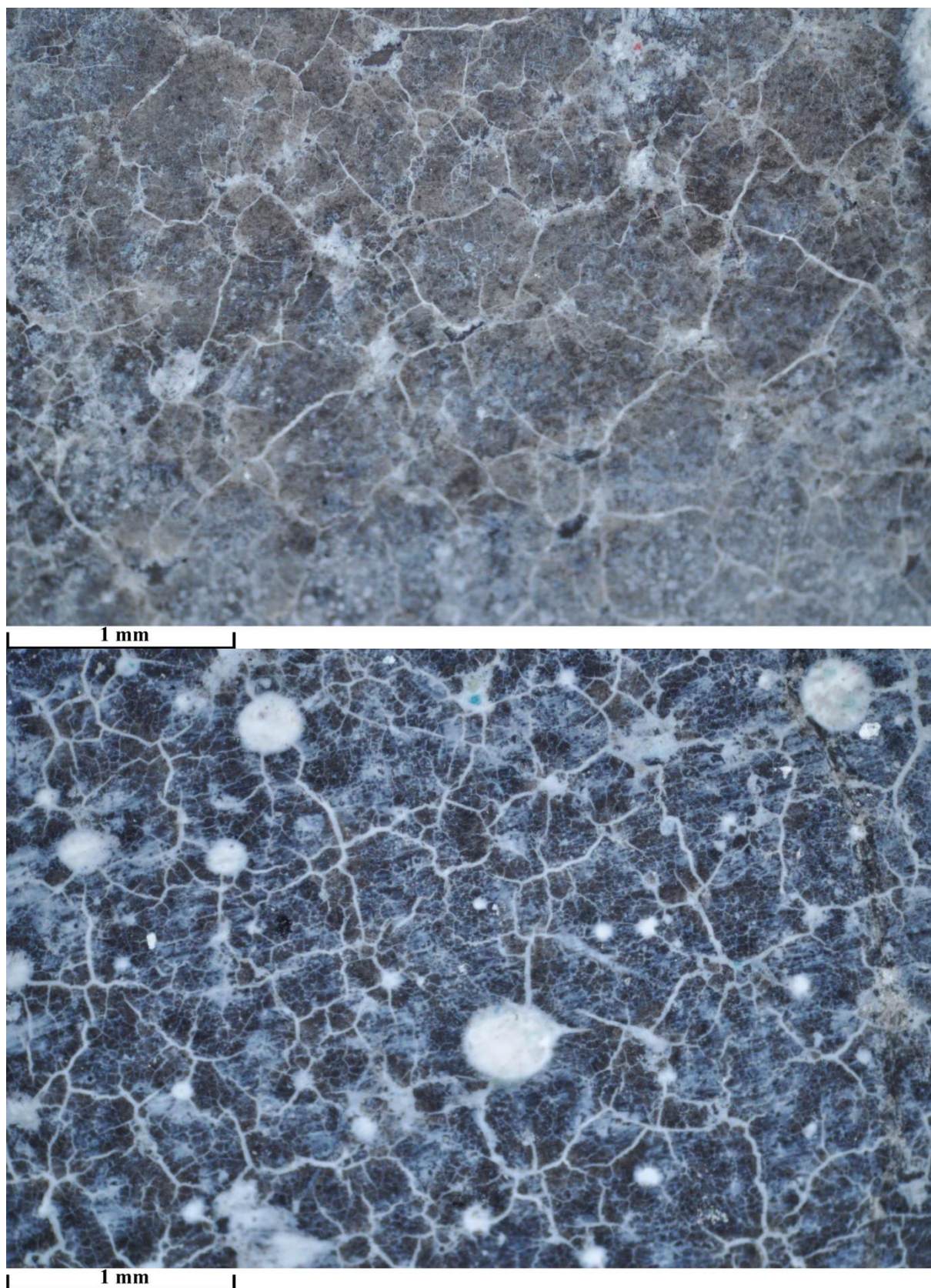
Hm. % CNT	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4
1% suspenze CNT (g)	0	7	14	28	42	56
rozměry $s_d$ (cm)	3	3	3,1	3,1	3	3,1
tloušťka $h$ (cm)	1,05	1,1	1,1	1,1	1,15	1,1
hmotnost (g)	17,68	19,11	19,39	19,09	18,92	18,72
$\rho_v$ (g·cm <sup>-3</sup> )	1,8709	1,9303	1,8343	1,8059	1,8280	1,7709

Na mikrofotografiích referenčního vzorku pro vzorky s CNT a vzorků s CNT na Obr. 23 a Obr. 24 jsou vidět zrna křemenného písku v amorfni AF a vzniklé povlaky uhličitanu sodného ve směsi s dalšími látkami vylučovanými v průběhu času na povrchu vzorků prostupováním iontů v AF (takzvané výkvěty).



Obr. 23: Povrch alkalicky aktivovaného aluminosilikátu (AAA) – referenčního vzorku pro série vzorků s uhlíkovými nanotrubičkami (CNT)





*Obr. 24: Povrch vzorků alkalicky aktivovaných aluminosilikátů (AAA) s 0,1 % uhlíkových nanotrubiček (CNT) v AF – aluminosilikátové fázi (nahore) a 0,3 % CNT v AF (dole)*

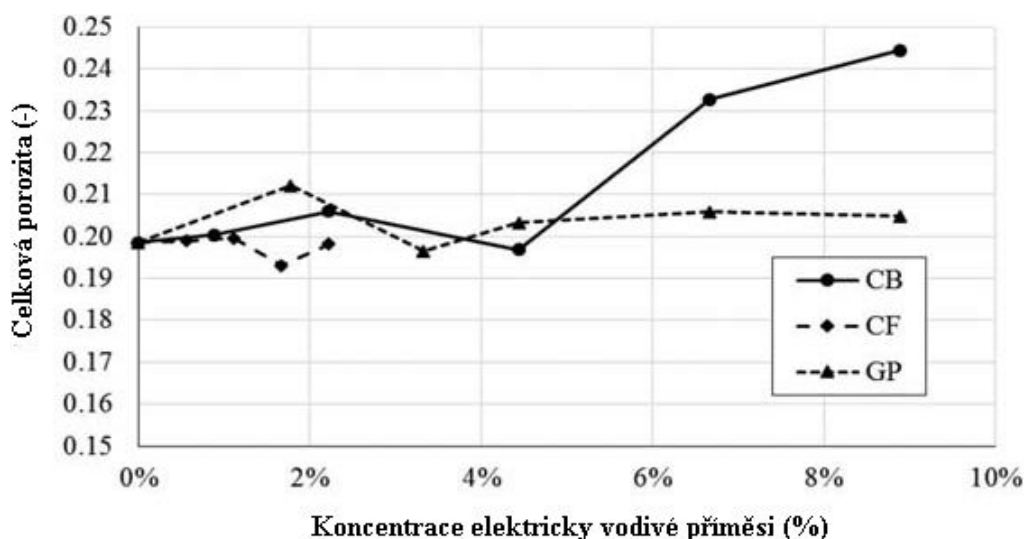
### 3.1.6 Kontaktování vzorků

Na vzorky AAA s CB, GP, CF a CNT a referenční vzorky byly pomocí uhlíkové pasty [38] nanесeny páry podélných a příčných elektrod. Pro vzorky s CB, GP, CF byly rozměry podélných a příčných elektrod  $(4 \times 1) \text{ cm}^2$  a  $(4 \times 2) \text{ cm}^2$  a pro vzorky s CNT  $(3 \times 1) \text{ cm}^2$ . Následně byly připevněny drátky na elektrody pomocí stříbrné pasty [39] (viz Obr 29 vpravo).

## 3.2 Vlastnosti elektricky vodivých betonů s uhlíkovými příměsemi

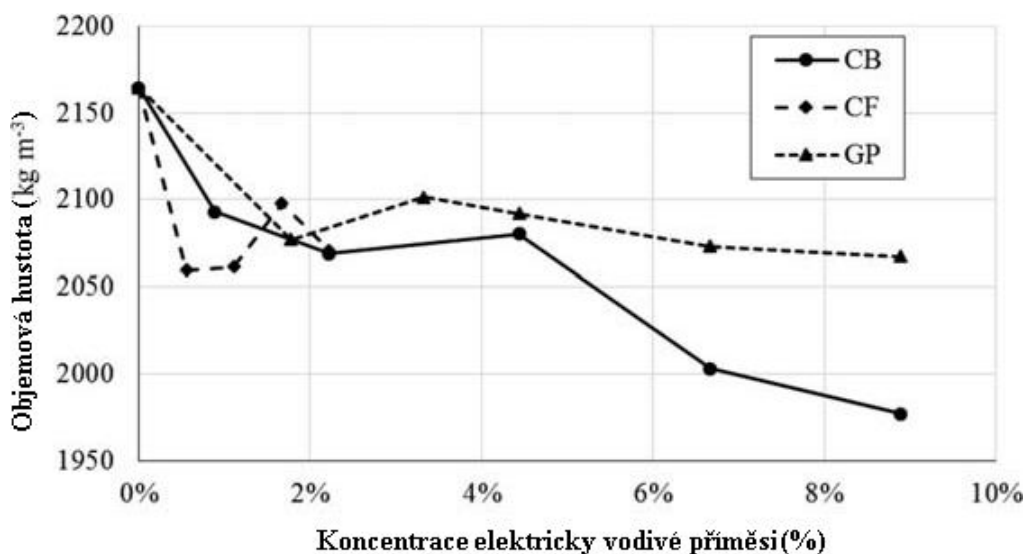
### 3.2.1 Vzorky s uhlíkovými sazemi, grafitovým práškem a uhlíkovými vlákny

Výše uvedeným postupem (viz kapitoly 3.1.1 až 3.1.4) byly na Fakultě stavební Českého vysokého učení technického v Praze připraveny vzorky elektricky vodivých betonů (ECC) na bázi alkalicky aktivovaných aluminosilikátů (AAA) s přísávkou uhlíkových sazí (CB), grafitového prášku (GP) a uhlíkových vláken (CF) o rozměrech přibližně  $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$  [36]. Byly změřeny jejich koncentrační závislosti objemové hustoty, porozity a po rozřezání na vzorky o rozměrech přibližně  $(4 \times 4 \times 1) \text{ cm}^3$  také koncentrační závislosti měrné elektrické vodivosti (viz Obr. 25 až Obr. 27). Vzorky s GP vykazovaly vyšší hustotu materiálu, než vzorky s CB a CF. Nejvyšší porozitu vykazoval vzorek s 8,89 % CB. Elektricky vodivé příměsi snižovaly pevnost v tlaku. Přísávkou CF a GP nicméně zvyšovaly výslednou pevnost v tahu. Přísávkou GP a CF zvyšovaly měrnou elektrickou vodivost vzorků mnohem méně, než přísávkou CB při koncentraci nad 2 % v AF.

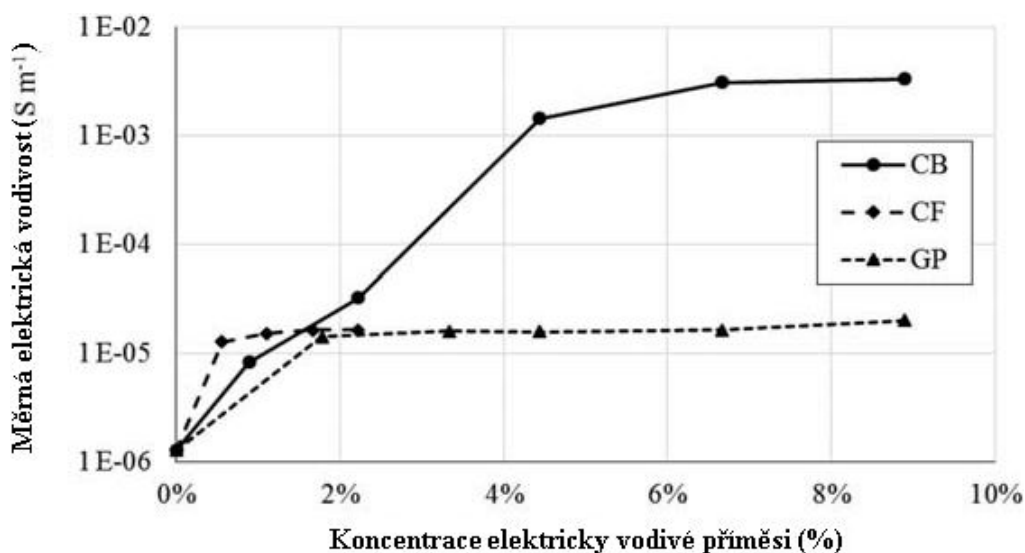


Obr. 25: Porozity vzorků AAA s uhlíkovými sazemi (CB), grafitovým práškem (GP) a uhlíkovými vlákny (CF)[36]





Obr. 26: Objemové hustoty vzorků AAA s CB, GP a CF [36]



Obr. 27: Měrné elektrické vodivosti vzorků AAA s CB, GP a CF [36]

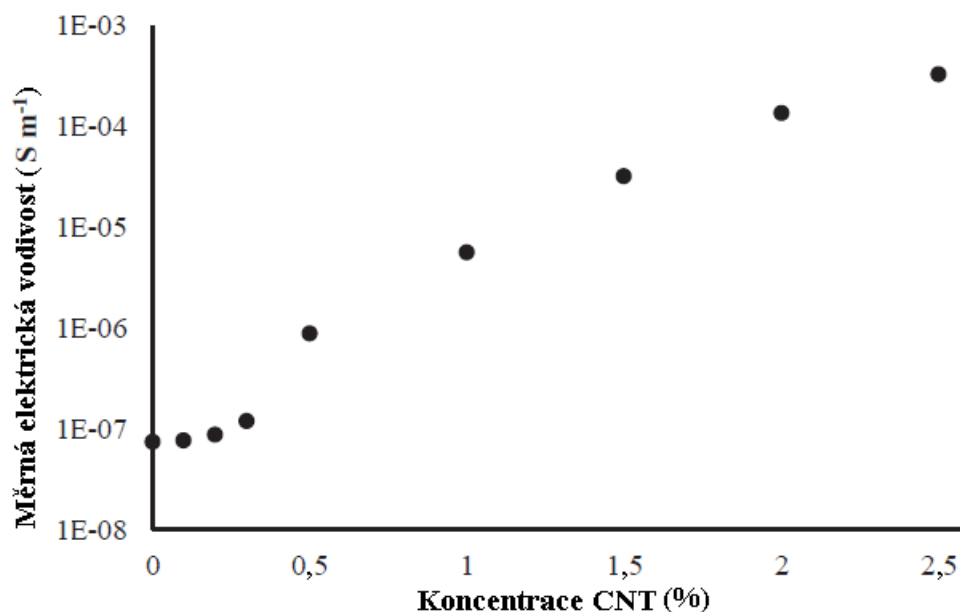
### 3.2.2 Vzorky s grafitovým práškem, uhlíkovými vlákny a CNT

Pro studie [40–44] byly připraveny použitím obecného postupu uvedeného v kapitole 3.1.1 vzorky ECC na bázi alkalicky aktivované strusky s přísadkou (1–30) hm. % grafitového prášku v aluminosilikátové fázi (AF).

Do výchozí směsi při přípravě vzorků byl přidán odpěňovač lukosan [40]. Nejnižší rezistivitu pro nízké frekvence měl vzorek s 15 % GP a perkolační práh byl 4 % GP v AF. Pevnost v tlaku klesala s koncentrací GP. Pomocí impedanční spektroskopie bylo zjištěno, že přísadek (1–10) hm. % GP do AF AAA způsobil snížení polarizace volných kationtů v ECC.

Pro studii [44] byly stejným obecným postupem (viz kapitola 3.1.1) připraveny vzorky AAA obsahující v AF (0–4) hm. % uhlíkových vláken Tenax A HT C124 o délce 3 mm. Perkolační práh byl zde dosažen již při 2 % CF. Přísadek CF zde způsoboval pokles pevnosti v tahu i pevnosti v tlaku. Tento efekt byl způsoben nízkou pevností v tlaku CF a zvýšením poměru obsahu vody a alkalicky aktivované strusky ( $w/c$ ) u vzorků s přísadkou CF.

Pro studie [45] a [46] byly stejným obecným postupem (viz kapitola 3.1.1) připraveny vzorky AAA obsahující v aluminosilikátové fázi (0–2,5) hm. % CNT Graphistrength CW 2-45 [37] a změřeny jejich voltampérové charakteristiky (viz Obr. 28) Perkolační prahu bylo dosaženo při 0,5 % CNT a nejvyšší pevnosti v tlaku při 0,1 % CNT.

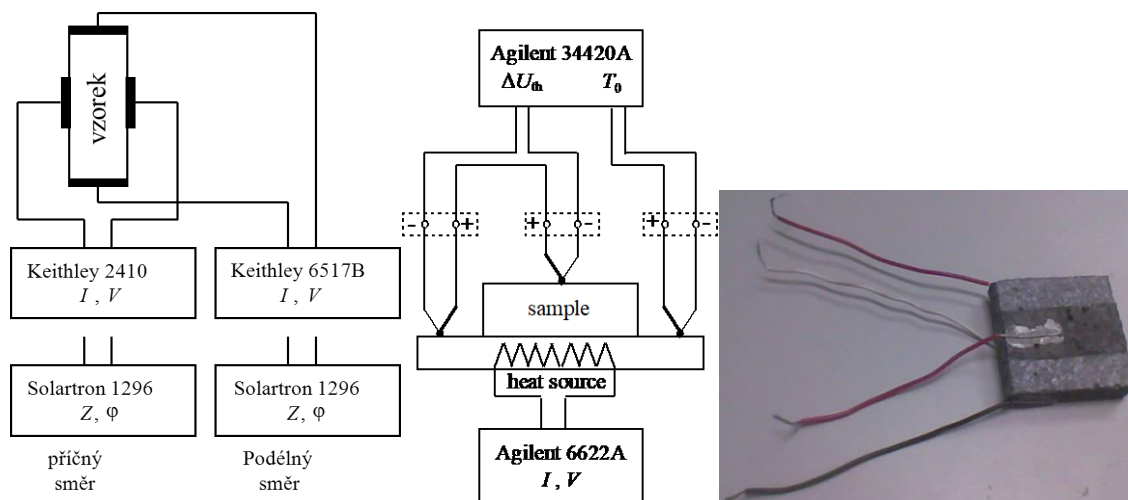


Obr. 28: Závislost měrné elektrické vodivosti na koncentraci přídavku CNT v aluminosilikátové fázi [45]

### 3.3 Charakterizace vzorků

#### 3.3.1 Uspořádání experimentu

Na Obr 29 jsou uvedena schémata zapojení měřících přístrojů pro měření volt-ampérových (V-A) charakteristik a impedančních spekter (vlevo), pro teplotní měření (uprostřed) a fotografie měřeného vzorku AAA s 4,44 % GP (vpravo).



Obr 29: Schéma zapojení měřících přístrojů pro měření V-A charakteristik a impedančních spekter (vlevo), měřící aparatury pro teplotní měření (uprostřed) a fotografie kontaktovaného vzorku AAA s 4,44 hmotnostními % grafitového prášku (vpravo)

### 3.3.2 Měření elektrických vlastností

Volt-ampérové (V-A) charakteristiky vzorků AAA byly změřeny pomocí přístrojů Keithley 6517B Electrometer (viz. Obr. 30 vlevo) a Keithley 2400 Sourcemeter (viz. Obr. 30 vpravo) v čtyřelektrodovém zapojení. Před měřením byla zvolena hodnota napětí  $U$ , pro první přístroj byl nastaven rozsah měření  $-U$  až  $U$  a pro druhý přístroj stálá hodnota napětí v tomto intervalu. Tímto způsobem byly proměřeny V-A charakteristiky v podélném i příčném směru, schéma zapojení je uvedeno na Obr 29, vlevo. Na základě změřených V-A charakteristik vzorků byly určeny jejich měrné elektrické vodivosti.



Obr. 30: Keithley 6517B Electrometer (vlevo) [47] a Keithley 2400 Sourcemeter (vpravo) [48]

### 3.3.3 Měření dielektrických vlastností

Impedanční spektra vzorků AAA byla měřena pomocí impedančního analyzátoru Solartron Si 1260 (viz. Obr. 31 vlevo) s pomocným modulem Solartron Si 1296 Dielectric Interface (viz Obr. 31 vpravo). Všechna měření byla provedena se střídavým napětím 0,1 V a nulovým stejnosměrným předpětím (biasem). Na základě změřených impedančních spekter vzorků byly určeny parametry jejich ekvivalentních obvodů.

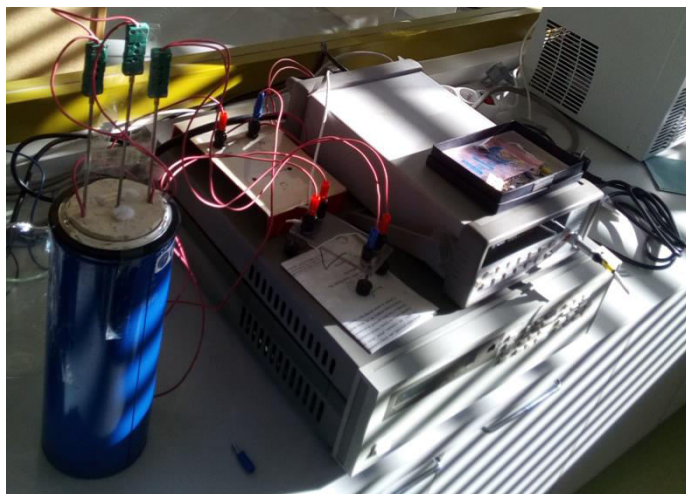


Obr. 31: Impedanční analyzátor Solartron Si 1260 (vlevo) [49] a Modul Solartron Si 1296 Dielectric Interface (vpravo) [50]

### 3.3.4 Měření tepelných vlastností

Teplotní měření vzorků AAA byla provedena v Dewarově nádobě. Vzorky byly zahřívány plošným kovovým tepelným zdrojem se zabudovaným rezistorem. Výkon tepelného pulzu byl při měření generován pomocí elektrického zdroje Agilent 6622A [51] a byl přibližně 4,2 W, čas trvání pulzu byl 12 hodin (vyjimku tvořil vzorek polymetylmetakrylátu – PMMA, který byl měřen při výkonu tepelného zdroje 0,92 W).

Teplotní senzory (termočlánky) byly umístěny uvnitř Dewarovy nádoby a připojeny k nanovoltmetru Agilent 34420A [52]. Jedním termočlánkem typu K byla měřena teplota zdroje tepla. Dalšími dvěma termočlánky typu K zapojenými v sérii s opačnou polaritou, z nichž jeden byl umístěn na zdroji tepla a druhý na vrcholu vzorku byl měřen teplotní rozdíl  $\Delta T$  mezi oběma stranami vzorku. Fotografie měřicí aparatury je na *Obr. 32* a schéma zapojení měření je na *Obr. 29* uprostřed. Z naměřených elektrických napětí na termočláncích byly stanoveny časové závislosti teplot pomocí kalibračních křivek.



*Obr. 32: Měřicí aparatura pro teplotní měření, Dewarova nádoba (vlevo) nanovoltmetr Agilent 34420A (vpravo nahoře) [52] a elektrický zdroj Agilent 6622A (vpravo dole) [51]*

### 3.3.5 Optická mikroskopie

Mikrofotografie vybraných vzorků AAA byly pořízeny pomocí optického mikroskopu Nikon Eclipse E200 a digitálního fotoaparátu Nikon D5000. Na mikroskopu bylo zvoleno čtyřnásobné zvětšení a osvětlením shora.



*Obr. 33: Optický mikroskop Nikon Eclipse E200 (vlevo) [53] a digitální fotoaparát Nikon D5000 (vpravo) [54]*

## 4 VÝSLEDKY A DISKUZE

V této kapitole jsou prezentovány výsledky měření elektrických, dielektrických a tepelných vlastností vzorků alkalicky aktivovaných aluminosilikátů (AAA) s přídavky uhlíkových sazí (CB), grafitového prášku (GP) uhlíkových vláken (CF) a uhlíkových nanotrubiček (CNT) a jejich vyhodnocení. Použité vzorky byly vyhodnoceny z hlediska vlivu použitých příměsí na strukturu materiálu a stanovení nehomogenit vzorků.

Elektrické vlastnosti jsou vyhodnoceny z hlediska vlivu působení vysokých napětí a kolmo působících elektrických polí na měrnou elektrickou vodivost vzorků v závislosti na použité uhlíkové příměši.

Dielektrické vlastnosti jsou vyhodnoceny z hlediska vlivu uhlíkových přídavků na elektrické a dielektrické vlastnosti jednotlivých složek kompozitních směsí vzorků.

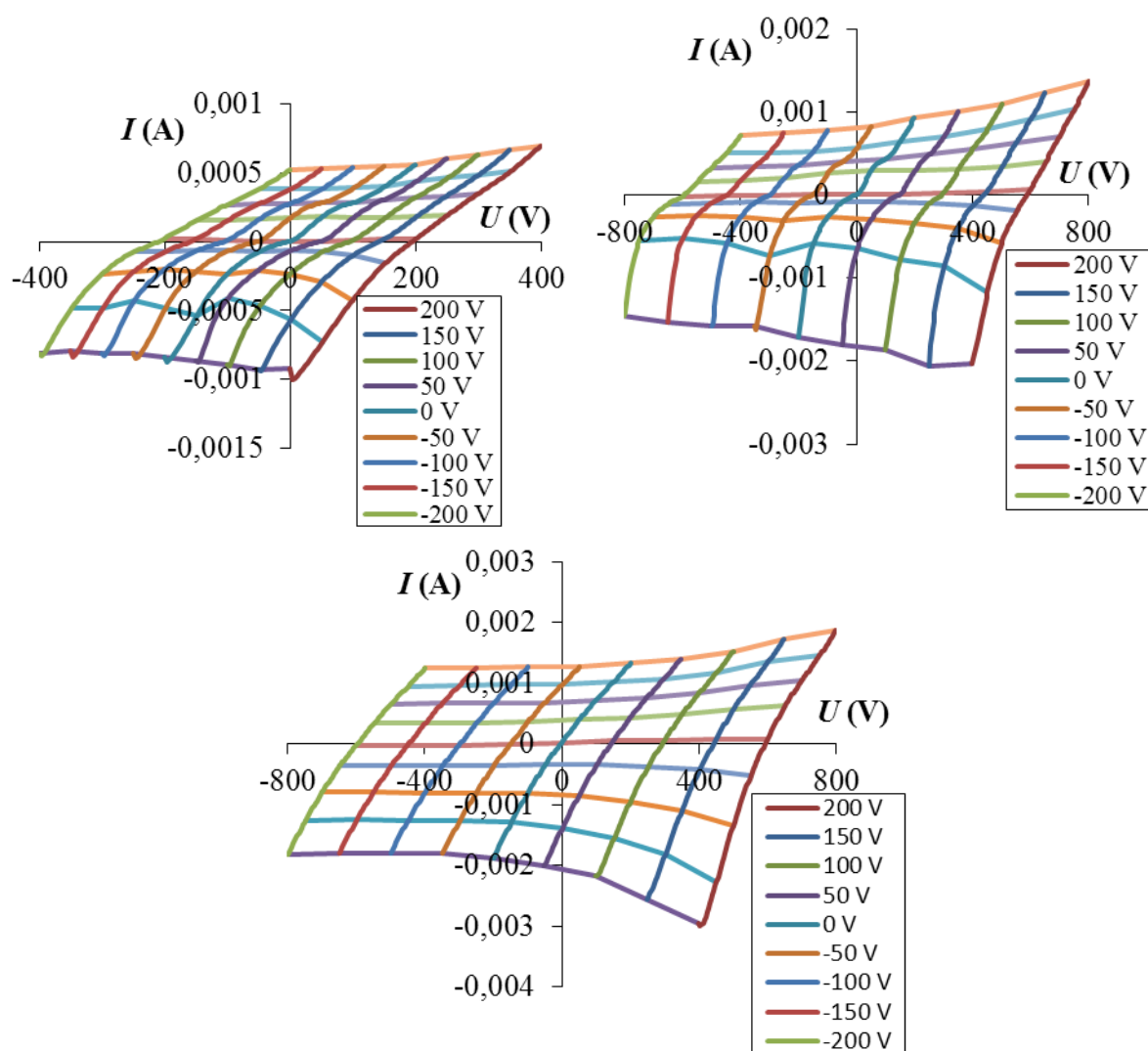
Tepelné vlastnosti jsou vyhodnoceny z hlediska vlivu uhlíkových přídavků na měrnou tepelnou vodivost  $\lambda$ , měrnou tepelnou kapacitu  $c$  a teplotní vodivost  $a$  vzorků.

## 4.1 Elektrické vlastnosti

### 4.1.1 Uhlíkové saze

Volt-ampérové (V-A) charakteristiky vzorků AAA s uhlíkovými sazemi (CB) byly změřeny v rozsahu  $-200\text{ V}$  až  $200\text{ V}$  za současného působení kolmého elektrického napětí. Na Obr. 34 jsou V-A charakteristiky změřené v příčném směru pro různá konstantní podélná napětí. Za účelem názorného zobrazení V-A charakteristik pro různá kolmo působící (v tomto případě příčná) napětí byly vytvořeny prostorové grafy posunem V-A charakteristik na napěťové ose, tento posun byl přímo úměrný hodnotě působícího kolmého (v tomto případě příčného) napětí.

Je patrné, že vzorek s 4,44 % CB v aluminosilikátové fázi (AF) vykazoval mnohem vyhlazenější V-A charakteristiky, než referenční vzorek a vzorek s 0,89 % CB v AF, což lze vysvětlit vytvořením stabilní vodivé sítě CB v celém vzorku.



Obr. 34: Volt-ampérové charakteristiky v příčném směru zobrazené posunuté dle napětí v podélném směru pro vybrané vzorky s různými koncentracemi CB: 0 % (vlevo nahoře, referenční vzorek), 0,89 % (vpravo nahoře) a 4,44 % (dole)

Ze stanovených měrných elektrických vodivostí (konduktivit) vzorků pro nízká aplikovaná napětí a nulová kolmo působící napětí v tabulce (Tabulka 12) lze určit, že při 0,33 % a 0,44 % CB v aluminosilikátové fázi (AF) jsou rozdíly mezi měrnými elektrickými vodivostmi (elektrickými konduktivitami) se stejnou koncentrací CB v AF relativně velké (až dvojnásobné).

Ze závislosti měrné elektrické vodivosti (elektrické konduktivity) na koncentraci CB v AF na Obr. 38 druhé řady vzorků lze určit, že se elektrická konduktivita zvyšuje se stoupající koncentrací CB pouze do 6,66 % CB, kdy bylo dosaženo maximum konduktivity přibližně 0,01 S/m. Při koncentraci 4,44 % CB a elektrické konduktivitě v příčném směru přibližně 0,001 S/m bylo dosaženo perkolačního prahu.

*Tabulka 12: naměřené hodnoty elektrických odporů (rezistancí) a konduktivit vzorků AAA s CB a referenčního vzorku pro podélný a příčný směr*

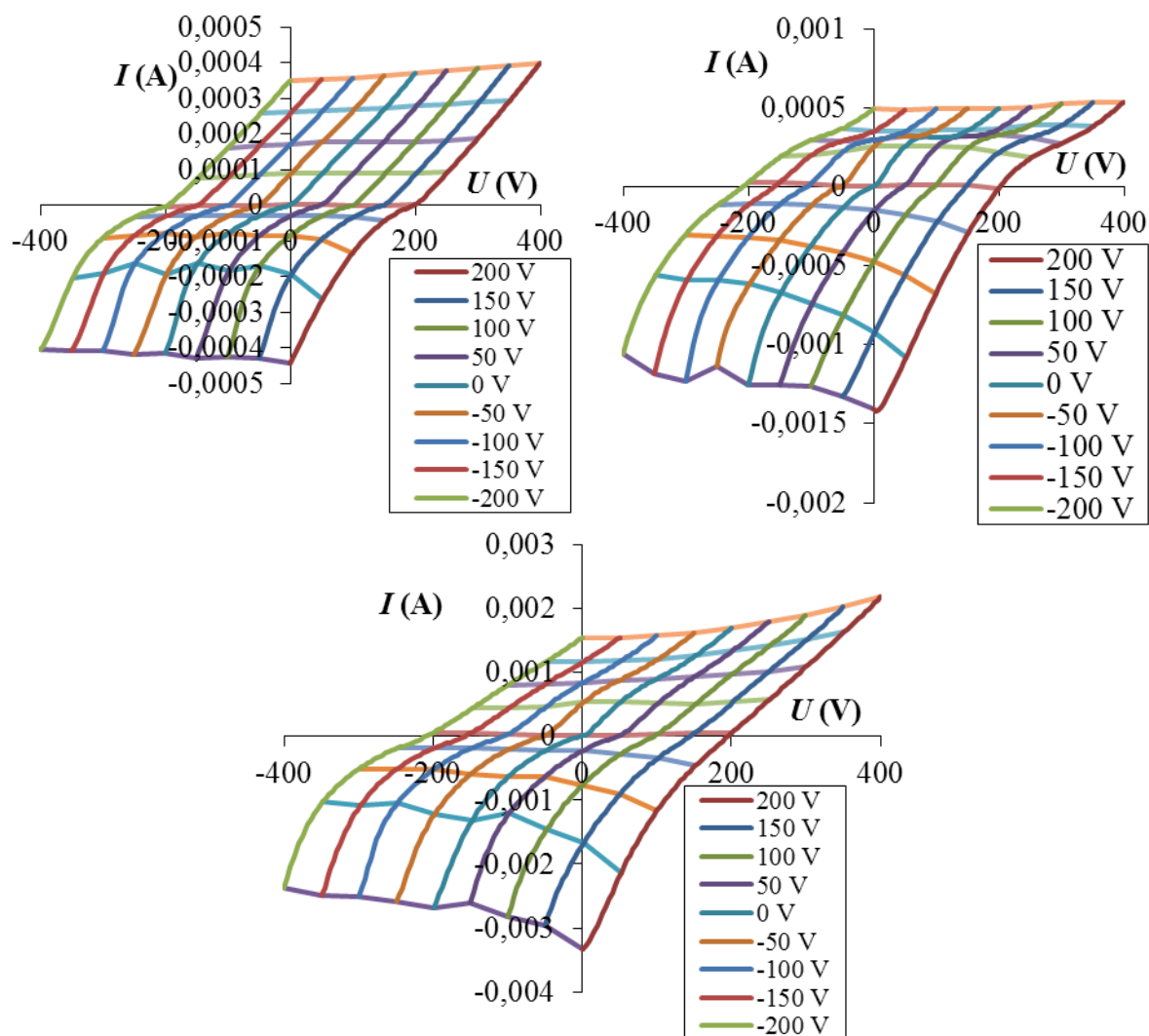
kompozit AAA-CB	koncentrace CB	Podélný směr		Příčný směr	
		rezistance (MΩ)	konduktivita (μS/m)	rezistance (MΩ)	konduktivita (μS/m)
první řada	0,33 %	2,49	30,85	0,42	38,77
	0,33 %	1,44	49,76	0,43	39,70
	0,33 %	1,42	29,31	0,51	57,00
	0,44 %	3,30	28,86	0,37	34,26
	0,44 %	2,19	39,72	0,42	33,50
	0,44 %	3,82	21,79	0,68	21,48
druhá řada	0,00 %	1,37	69,48	0,42	30,87
	0,89 %	0,74	129,01	0,27	49,34
	4,44 %	0,06	1481,70	0,14	98,69
	6,66 %	0,02	4543,94	0,00	10377,18
	8,89 %	0,02	5023,09	0,00	9957,20



### 4.1.2 Grafitový prášek

V-A charakteristiky vzorků AAA s grafitovým práškem (GP) byly změřeny v rozsahu  $-200$  V až  $200$  V. Na Obr. 35 jsou V-A charakteristiky měřené v příčném směru pro různá konstantní podélná napětí. Pro zobrazení V-A charakteristik pro různá příčná napětí byly vytvořeny prostorové grafy posunem V-A charakteristik na napěťové ose, který je přímo úměrný velikosti kolmo působícího příčného napětí.

Je patrné, že vzorek s 3,33 % grafitového prášku (GP) v aluminosilikátové fázi (AF) vykazoval mírné zvýšení linearitu V-A charakteristik, oproti vzorkům s 0,44 % a 1,11 % GP v AF, které lze vysvětlit zvýšením přímé elektronové vodivosti vlivem přídavku GP.



Obr. 35: Volt-ampérové charakteristiky v příčném směru zobrazené posunuté dle napětí v podélném směru pro vzorky s 0,44 % GP (vlevo nahoře), 1,11 % GP (vpravo nahoře) a 3,33 % GP (dole)

Ze stanovených měrných elektrických vodivostí (konduktivit) vzorků s GP pro nízká aplikovaná napětí a nulová kolmo působící napětí v tabulce (Tabulka 13) lze určit, že při koncentracích GP 0,33 % a 0,44 % jsou rozdíly mezi měrnými elektrickými vodivostmi vzorků se stejnou koncentrací GP velké (až trojnásobné).

Ze závislostí měrné elektrické vodivosti (konduktivity) na koncentraci GP v AF druhé řady vzorků na Obr. 38 lze určit, že elektrická konduktivita se zvyšuje se stoupající koncentrací GP pouze do 2,22 % GP, při této koncentraci bylo dosaženo maximální měrné elektrické vodivosti v podélném směru 0,321 mS/m. Při koncentraci 0,89 % GP v AF a měrné elektrické vodivosti v podélném směru 0,178 mS/m bylo tedy dosaženo perkolačního prahu.

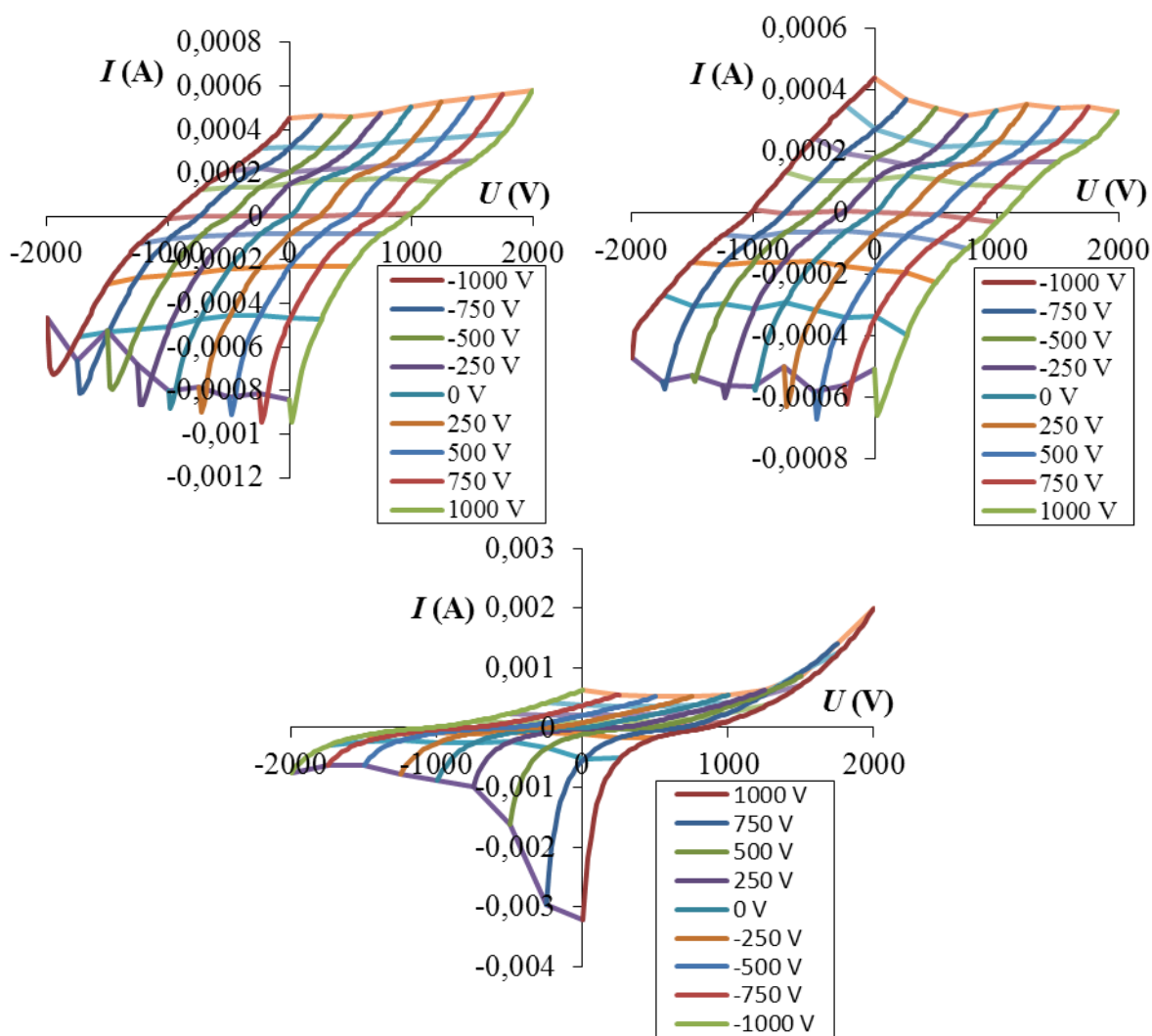
*Tabulka 13: naměřené hodnoty elektrických odporů (rezistancí) a měrných elektrických vodivostí (konduktivit) vzorků AAA s GP pro podélný a příčný směr*

kompozit AAA-GP	koncentrace GP	Podélný směr		Příčný směr	
		rezistance (MΩ)	konduktivita (μS/m)	rezistance (MΩ)	konduktivita (μS/m)
první řada	0,33 %	1,73	52,48	0,57	23,44
	0,33 %	2,97	30,57	2,97	4,57
	0,33 %	1,27	34,13	0,28	102,91
	0,44 %	1,82	42,19	0,86	18,90
	0,44 %	2,98	27,97	0,28	53,13
	0,44 %	0,99	42,03	0,60	50,39
druhá řada	0,00 %	1,37	72,95	0,42	29,77
	0,89 %	0,62	178,94	0,22	51,68
	1,11 %	0,77	123,64	0,26	51,24
	1,78 %	0,49	184,39	0,16	87,88
	2,22 %	0,35	321,24	0,20	57,18
	2,67 %	0,49	206,15	0,16	79,33
	3,33 %	0,50	199,23	0,14	94,54
	4,44 %	0,53	189,02	0,14	87,98
	6,67 %	0,40	227,04	0,09	154,26
	8,89 %	0,44	207,22	0,10	135,92

### 4.1.3 Uhlíková vlákna

V-A charakteristiky vzorků AAA s uhlíkovými vlákny (CF) byly změřeny v rozsahu  $-1000$  V až  $1000$  V. Na Obr. 36 jsou V-A charakteristiky měřené v příčném směru za působení různých konstantních podélných napětí. Za účelem názorného zobrazení V-A charakteristik pro různá kolmo působící příčná napětí byly vytvořeny prostorové grafy posunem V-A charakteristik na napěťové ose, který je přímo úměrný velikosti kolmo působícího příčného napětí.

Je patrné, že vzorky s  $0,56$  % a  $0,33$  % CF v AF vykazovaly lineárnější V-A charakteristiky, než vzorky s  $2,22$  % CF v aluminosilikátové fázi (AF). To lze vysvětlit zvýšenou iontovou vodivostí vlivem snížení koncentrace pórů s vyšším poměrem hodnot povrchu a objemu díky aglomeraci CF.



Obr. 36: Volt-ampérové charakteristiky v příčném směru zobrazené posunuté dle napětí v podélném směru pro vybrané vzorky s různými koncentracemi CF:  $0,33$  % (vlevo nahoře),  $0,56$  % (vpravo nahoře) a  $2,22$  % (dole)

Ze stanovených měrných elektrických vodivostí (konduktivit) vzorků s CF pro nízká aplikovaná napětí a nulová kolmo působící napětí v tabulce (Tabulka 14) lze určit, že při koncentracích CF 0,11 % až 0,44 % CF v AF jsou rozdíly měrných elektrických vodivostí mezi vzorky se stejnou koncentrací CF velmi vysoké (i více, než desetinásobné).

Ze závislostí měrné elektrické vodivosti (konduktivity) na koncentraci CF v AF druhé řady vzorků na *Obr. 38* lze určit, že elektrická konduktivita se ustálila po dosažení 1,11 % CF. Při této koncentraci a měrné elektrické vodivosti v podélném směru přibližně 31,48  $\mu\text{S/m}$  bylo tedy dosaženo maximální měrné elektrické vodivosti. Měrné elektrické vodivosti vzorků s CF byly nižší, než měrná elektrická vodivost referenčního vzorku, která byla vysoká zřejmě díky vysoké iontové vodivosti. Perkolační prahu díky tomu nebylo dosaženo. Vyšší měrná elektrická vodivost v podélném směru zde znamenala, že CF vytvořila lepší vodivou síť díky orientaci svých vláken v podélném směru.

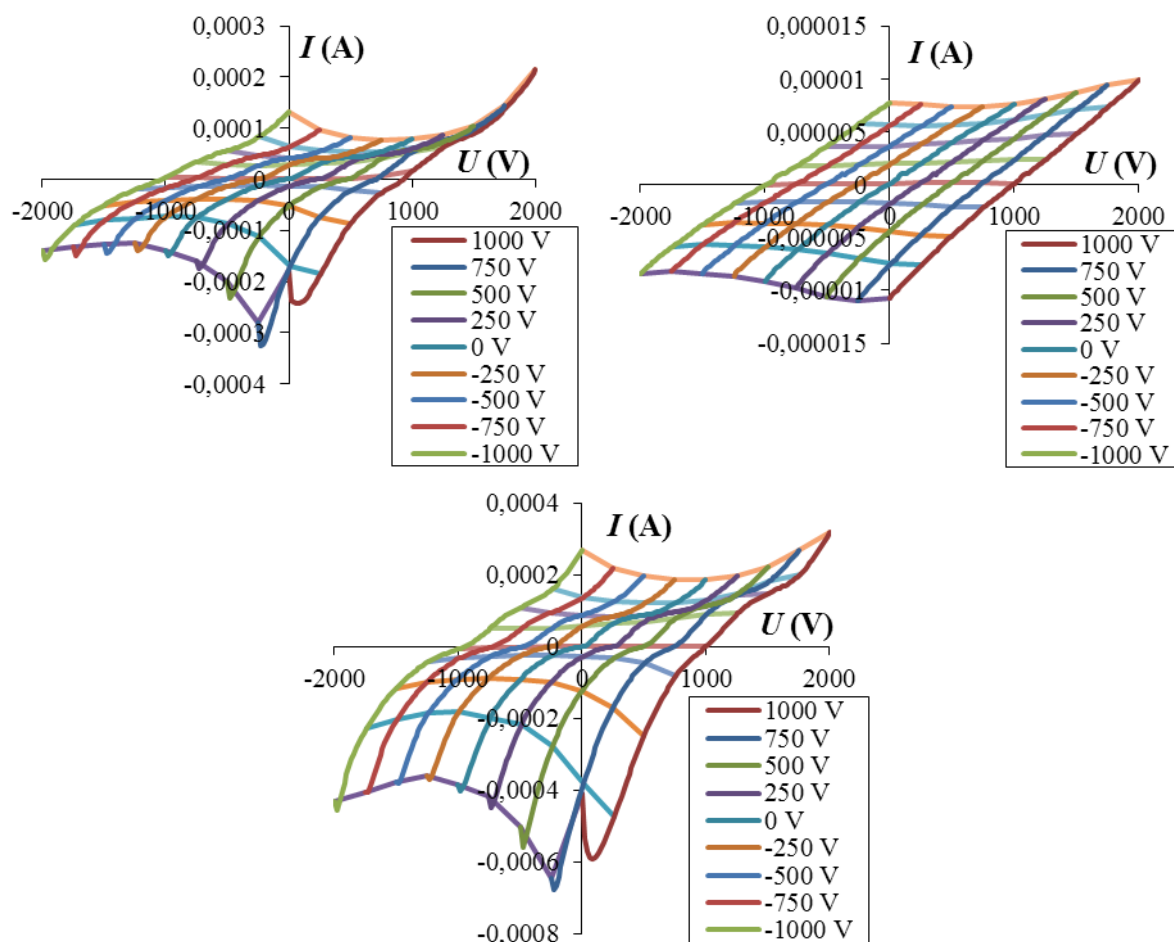
*Tabulka 14: stejnosměrná vodivost vzorků CF pro podélný a příčný směr*

kompozit AAA-CF	koncentrace CF	Podélný směr		Příčný směr	
		rezistance (M $\Omega$ )	konduktivita ( $\mu\text{S/m}$ )	rezistance (M $\Omega$ )	konduktivita ( $\mu\text{S/m}$ )
první řada	0,11 %	2,25	37,09	1,28	11,76
	0,11 %	6,09	16,07	2,15	5,81
	0,22 %	8,35	10,89	1,61	8,32
	0,22 %	6,00	15,01	3,03	4,58
	0,33 %	4,15	20,09	1,92	7,82
	0,33 %	44,76	1,86	22,83	0,64
	0,33 %	3,94	24,85	4,23	3,02
	0,44 %	9,20	9,05	2,71	5,40
	0,44 %	9,39	8,87	38,44	0,39
	0,44 %	1,86	54,96	5,02	2,37
druhá řada	0,00 %	1,37	69,48	0,42	30,87
	0,56 %	16,47	6,07	8,21	1,52
	1,11 %	2,89	31,48	10,52	1,28
	1,67 %	3,68	25,85	4,80	2,74
	2,22 %	3,86	25,91	4,04	3,09

#### 4.1.4 Uhlíkové nanotrubičky

V-A charakteristiky vzorků AAA s uhlíkovými nanotrubičkami (CNT) byly změřeny v rozsahu napětí  $-1000$  V až  $1000$  V. Na Obr. 37 jsou V-A charakteristiky měřené v příčném směru pro různá aplikovaná konstantní podélná napětí. Pro zobrazení V-A charakteristik pro různá kolmo působící příčná napětí byly vytvořeny prostorové grafy posunem V-A charakteristik na napěťové ose, který je přímo úměrný velikosti kolmo působícího příčného napětí.

Je patrné, že vzorek s  $0,1$  % CNT v aluminosilikátové fázi (AF) vykazoval výrazně lineárnější V-A charakteristiky a menší měrnou elektrickou vodivost, než referenční vzorek a vzorek s  $0,3$  % CNT v AF. To lze vysvětlit snížením iontové vodivosti vlivem přídavku  $0,1$  % CNT.



Obr. 37: Volt-ampérové charakteristiky v příčném směru zobrazené posunuté dle napětí v podélném směru pro vybrané vzorky s různými koncentracemi CNT:  $0$  % (vlevo nahoře),  $0,1$  % (vpravo nahoře) a  $0,3$  % (dole)

Ze stanovených měrných elektrických vodivostí (konduktivit) vzorků AAA s CNT pro nízká aplikovaná napětí a nulová kolmo působící napětí v tabulce (Tabulka 15) lze určit, že při 0,1 % CNT v AF dochází k výraznému snížení elektrické konduktivity, elektrická konduktivita v podélném směru je oproti referenčnímu vzorku více, než desetkrát menší.

Ze závislostí měrných elektrických vodivostí (konduktivit) na koncentraci CNT v AF pro druhou řadu vzorků na *Obr. 38* lze určit, že měrná elektrická vodivost v koncentračním rozmezí 0,2 % až 0,4 % CNT v AF je poměrně stálá. Perkolačního prahu bylo dosaženo při koncentraci 0,4 % CNT.

*Tabulka 15: stejnosměrná vodivost vzorků CNT pro příčný a podélný směr*

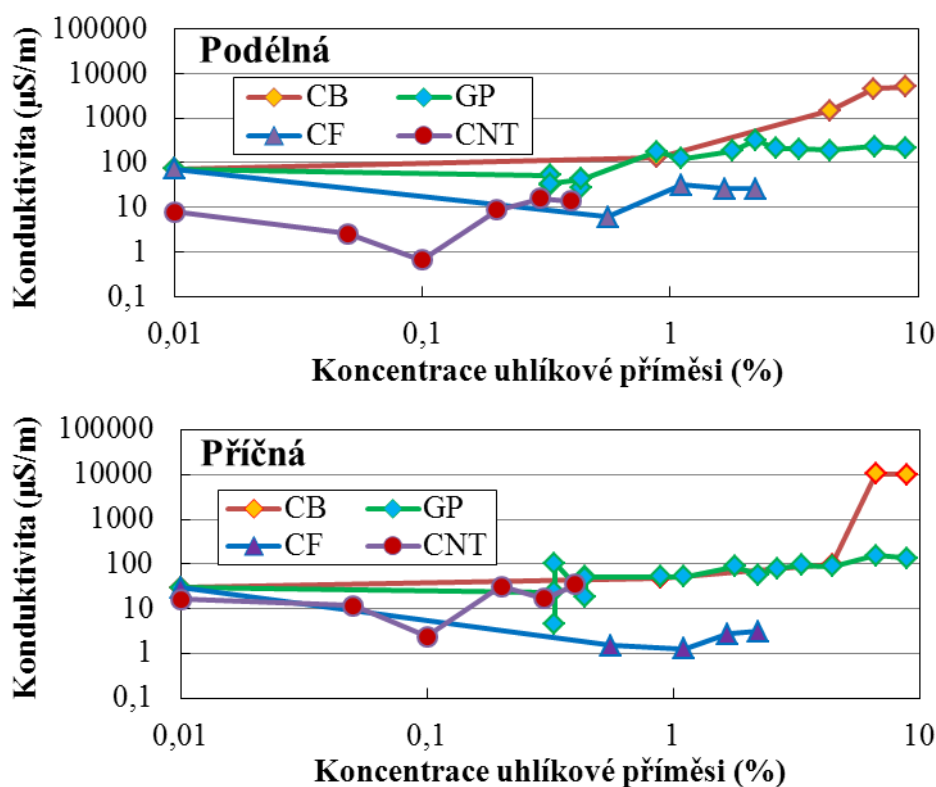
	koncentrace CNT	Podélný směr		Příčný směr	
		rezistance (MΩ)	konduktivita (μS/m)	rezistance (MΩ)	konduktivita (μS/m)
<b>kompozit AAA-CNT</b>	0,00 %	12,25	7,77	2,17	16,16
	0,05 %	36,05	2,52	3,10	11,81
	0,10 %	136,37	0,67	14,46	2,37
	0,20 %	10,51	8,65	1,09	31,64
	0,30 %	5,47	15,91	2,25	17,00
	0,40 %	6,69	13,59	1,00	34,46

#### 4.1.5 Souhrn výsledků

Diodový charakter V-A charakteristik vzorků AAA s přísady CB, GP, CF a CNT (rozdílná vodivost pro kladná a záporná napětí, viz *Obr. 34* až *Obr. 37*) je způsoben pravděpodobně rozdílnou koncentrací volných iontů v aluminosilikátové fázi (AF) různých částí vzorků.

Změny V-A charakteristik při změně podélného napětí jsou způsobeny nehomogenitou – rozdílností struktury a měrné elektrické vodivosti (konduktivity) v různých částech vzorků a změnami rozložení hustoty elektrického proudu v průřezu vzorků. Vliv na tvar V-A charakteristik měly také rozdíly mezi příčnými elektrodami.

Ze sumárních grafů na *Obr. 38* bylo určeno, že nejvyšší měrné elektrické vodivosti (konduktivity) měly vzorky s přísady CB, nižší měrnou elektrickou vodivost měly vzorky s GP, dále vzorky s CNT a nejnižších měrných elektrických vodivostí dosahovaly vzorky s příměsí CF. Referenční vzorky jsou zde zobrazeny jako vzorky s 0,01 % uhlíkové příměsí z důvodu použití logaritmického měřítka.



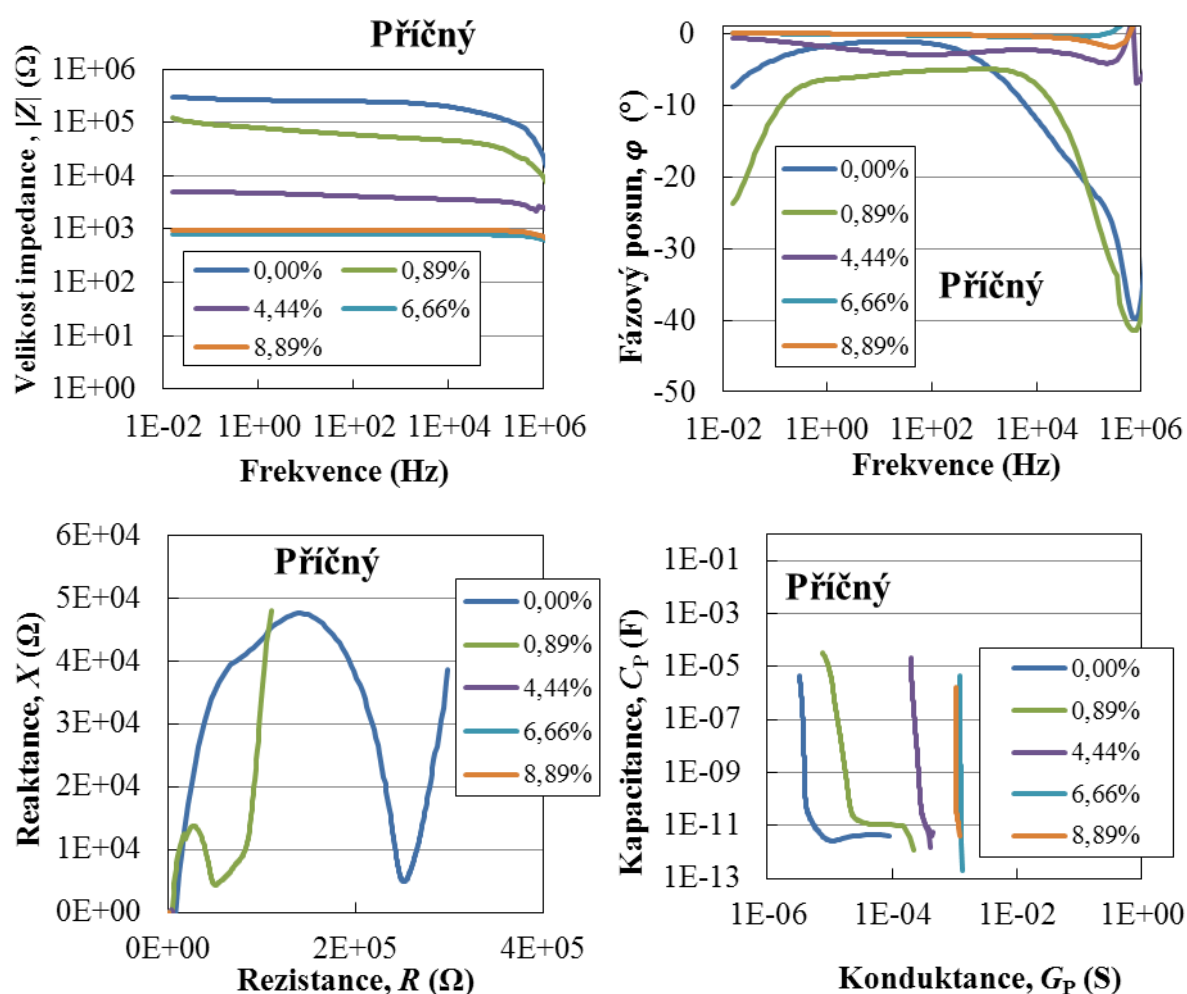
*Obr. 38: Závislosti měrných elektrických vodivostí (konduktivit) na koncentracích přísadků uhlíkových sazí (CB), grafitového prášku (GP), uhlíkových vláken (CF) a uhlíkových nanotrubiček (CNT) stanovené pro podélný směr (nahore) a příčný směr (dole) vzorků alkalicky aktivovaných aluminosilikátů (AAA)*



## 4.2 Dielektrické vlastnosti

### 4.2.1 Uhlíkové saze

Výsledky měření dielektrických vlastností v příčném směru pro druhou sérii vzorků s uhlíkovými sazemi (CB) jsou uvedeny na Obr. 39 ve formě Bodeových grafů (nahore), Cole-Cole diagramů (stanovených závislostí reaktance na rezistanci vlevo dole) a stanovené závislosti paralelní kapacity  $C_p$  na paralelní elektrické vodivosti  $G_p$  (vpravo dole). Z výsledků jsou patrné velké odchylky hodnot mezi vzorky s různými koncentracemi CB. Naměřená impedanční spektra byla při frekvencích nad 1 MHz zatížena chybami měření, proto jsou v této práci uvedeny pouze výsledky měření do 1 MHz. V rozsahu frekvencí (1–10 000) Hz vykazují impedanční spektra s výjimkou jednoho anomálního vzorku téměř bez výjimky odporový charakter s nízkým fázovým posunem, při vyšších nebo nižších frekvencích se naopak zvyšuje vliv elektrických kapacit jednotlivých složek (zvyšuje se fázový posun).



Obr. 39: Impedanční spektra: Závislosti velikosti impedance (vlevo nahoře) a fázového posunu (vpravo nahoře) na frekvenci, závislosti reaktance na rezistanci (vlevo dole) a paralelní kapacity na paralelní konduktanci (vpravo dole) v příčném směru druhé řady vzorků s CB a referenčního vzorku

Kapacitní charakter impedančních spekter je v nízkých frekvencích způsoben nízkou měrnou elektrickou vodivostí a vysokou elektrickou permitivitou a následně i elektrickou kapacitou křemenného písku [55].

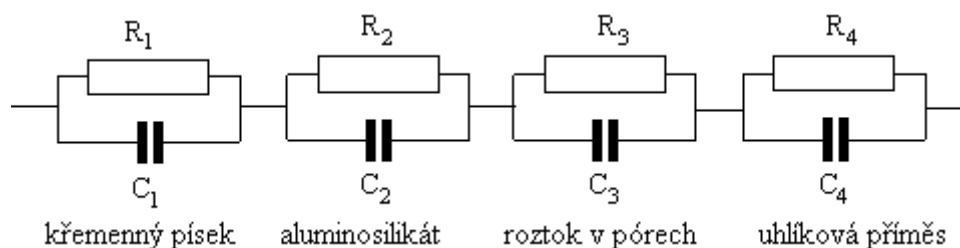
Při vysokých frekvencích je kapacitní charakter způsoben vyšší měrnou elektrickou vodivostí, nižší permitivitou a následně také nižší elektrickou kapacitou aluminosilikátové fáze (AF) [56] a dalších fází v kompozitu (dochází k většímu ovlivnění impedančních spekter elektrickou kapacitou AF a dalšími fázemi vlivem zvýšení frekvence). Pro frekvence v rozmezí (1–10 000) Hz je vliv elektrických kapacit (hromadění nábojů) nízký a proto impedační spektra vykazují odporový charakter (dominuje vedení elektrického proudu).

Výsledky měření v příčném směru pro druhou sérii vzorků na Obr. 39 ukazují, že stoupající koncentrace CB ve vzorcích způsobuje snižování fázového posunu a tedy také více odporový charakter impedančních spekter. Důvodem je proto zvyšování elektrické vodivosti vzorků.

Cole-Cole diagramy a závislosti  $C_p$  na  $G_p$  uvedené v přílohách (1a) a (1b) ukazují, že rozdíly v impedančních spektrech mezi vzorky při stejných koncentracích CB byly velmi výrazné (tyto odchylky jsou přisuzovány nehomogenitě připravených vzorků). Detailní analýzou těchto závislostí bylo zjištěno, že ekvivalentní obvod vzorků sestává ze sériově zapojených párů paralelních rezistorů a paralelních kapacitních členů konstantního fázového posunu (CPE) pro každou fázi kompozitu – pro křemenný písek, aluminosilikátovou fázi, roztok v pórech a elektricky vodivou příměs, v tomto případě CB (viz. Obr. 40). To platí i pro ostatní uhlíkové příměsi, výjimku z toho tvořila pouze AF série vzorků s CNT zastoupená paralelním zapojení kondenzátoru a CPE. Jednotlivé členy ekvivalentních obvodů byly přiděleny k daným materiálům na základě znalostí dielektrických vlastností křemenného písku [55], pasty z portlandského cementu strukturně podobné AAA, roztoku pórů [56] a elektrických vlastností uhlíkových vodivých příměsí (viz kapitola 2.4). Elektrické vodivosti a permitivity jednotlivých členů byly dále přepočítány na měrné elektrické vodivosti a permitivity jednotlivých fází vzorků vynásobením vzdáleností elektrod a vydělením plochou elektrod.

Impedanční spektra v podélném směru jsou uvedena v přílohách (1a) a (2a). Velikost impedance v podélném směru dosahuje přibližně desetinásobné hodnoty oproti velikosti impedance v příčném směru, zatímco zvýšení délky mezi elektrodami je pouze čtyřnásobné, to ukazuje na snížení měrné elektrické vodivosti, které může být způsobeno více přerušovanou elektricky vodivou sítí na větší délce nebo nehomogenitou vzorků.

Fázový posun je obvykle v podélném směru měření vyšší, než v příčném směru, což je způsobeno zvýšením rozptylu nosičů nábojů při delších vzdálenostech elektrod, případně nehomogenitami vzorků. Výsledky měření jsou ve shodě s výsledky měření elektrických vlastností těchto vzorků (elektrické odpory vzorků pro nízká stejnosměrná napětí bez kolmo působících napětí odpovídají velikostem impedancí při nízkých frekvencích).



Obr. 40: Schéma ekvivalentních obvodů vzorků alkalicky aktivovaných aluminosilikátů s uhlíkovými příměsemi.  $R_1$  a  $C_1$  představují elektrický odpor a kapacitu křemenného písku,  $R_2$  a  $C_2$  představují elektrický odpor a kapacitu aluminosilikátové fáze,  $R_3$  a  $C_3$  představují elektrický odpor a kapacitu vodného roztoku v pórech vzorků a  $R_4$  a  $C_4$  představují elektrický odpor a kapacitu elektricky vodivé uhlíkové příměsi

Protože kapacity jednotlivých složek vzorků nebyly ideální z důvodu rozptylu (disperze) nosičů nábojů, byl pro popis těchto kapacit využit člen konstantního fázového posunu (CPE) s parametrem  $n$  v rozmezí  $(0 - 1)$ , které představuje zobecněnou elektrickou kapacitu (hodnota 0 představuje ideální odpor a hodnota 1 ideální kondenzátor). Parametry ekvivalentních obvodů a tím i dielektrické vlastnosti jednotlivých fází vzorků jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 16).

Výsledky pro první sérii vzorků ukazují na velký rozptyl hodnot elektrického odporu, elektrické kapacity i CPE parametru  $n$  pro různé vzorky se stejnou koncentrací CB vlivem nehomogenit ve vzorcích vzorků. Ty způsobují snížení propojenosti vodivé sítě CB a zvýšení průměrných vzdáleností mezi řetězci CB, které musí elektrický proud v tomto vzorku překonávat.

*Tabulka 16: Parametry ekvivalentních obvodů podélného a příčného směru první a druhé série vzorků s CB získané matematickým modelováním*

<b>Podélný směr</b>	<b><math>R_1</math> (MΩ)</b>	<b><math>C_1</math> (μF)</b>	<b><math>n_{C1}</math></b>	<b><math>R_2</math> (MΩ)</b>	<b><math>C_2</math> (μF)</b>	<b><math>n_{C2}</math></b>	<b><math>R_3</math> (MΩ)</b>	<b><math>C_3</math> (nF)</b>	<b><math>n_{C3}</math></b>	<b><math>R_4</math> (MΩ)</b>	<b><math>C_4</math> (nF)</b>	<b><math>n_{C4}</math></b>
<b>0,00%</b>	4,50	35,00	0,50	0,22	8,00	0,65	0,93	0,08	0,76			
<b>0,33%</b>	5,00	15,50	0,35	0,05	12,00	0,35	0,25	4,00	0,68	0,47	0,050	0,90
<b>0,33%</b>	4,00	15,50	0,35	0,05	12,00	0,35	0,25	4,00	0,70	3,50	0,015	1,00
<b>0,33%</b>	5,00	3,00	0,55	0,25	0,20	0,55	0,09	150,00	0,60	1,15	0,060	0,72
<b>0,44%</b>	4,00	35,00	0,61	0,20	0,40	0,6	0,04	30,00	0,60	0,84	0,200	0,68
<b>0,44%</b>	700,00	0,01	0,55	10,00	0,00	0,7	5,00	0,04	0,73	38,00	0,005	0,97
<b>0,44%</b>	20,00	0,90	0,30	0,66	0,40	0,5	0,21	30,00	0,60	3,25	0,080	0,70
<b>0,89%</b>	5,0000	19,00	0,80	0,3800	2,00	0,27	0,0150	0,50	0,70	0,2100	0,02	0,95
<b>4,44%</b>	0,0200	12,00	0,35	0,0070	0,20	0,45	0,0010	10,00	0,40	0,0090	0,20	0,82
<b>6,67%</b>	0,0005	50,00	0,35	0,0010	20,00	0,1	0,0006	10,00	0,30	0,0060	0,10	0,90
<b>8,89%</b>	0,0002	50,00	0,35	0,0004	20,00	0,1	0,0002	10,00	0,30	0,0020	0,10	0,90
<b>Příčný směr</b>	<b><math>R_1</math> (MΩ)</b>	<b><math>C_1</math> (μF)</b>	<b><math>n_{C1}</math></b>	<b><math>R_2</math> (MΩ)</b>	<b><math>C_2</math> (μF)</b>	<b><math>n_{C2}</math></b>	<b><math>R_3</math> (MΩ)</b>	<b><math>C_3</math> (nF)</b>	<b><math>n_{C3}</math></b>	<b><math>R_4</math> (MΩ)</b>	<b><math>C_4</math> (nF)</b>	<b><math>n_{C4}</math></b>
<b>0,00%</b>	0,50	40000	0,45	0,16	4	0,62	0,09	0,18	0,72			
<b>0,33%</b>	1,20	45000	0,41	0,01	40000	0,35	0,03	40	0,63	0,09	0,65	0,73
<b>0,33%</b>	1,00	16000	0,62	0,01	40000	0,35	0,05	120	0,50	0,23	0,15	0,73
<b>0,33%</b>	0,50	120000	0,40	0,05	11000	0,40	0,00	100	0,63	0,01	2,00	0,73
<b>0,44%</b>	4,00	50000	0,40	0,01	4000	0,50	0,01	300	0,60	0,10	2,00	0,64
<b>0,44%</b>	12,00	17000	0,60	0,09	4000	0,60	0,08	70	0,65	0,43	0,25	0,70
<b>0,44%</b>	4,00	20000	0,50	0,01	4000	0,50	0,01	300	0,60	0,14	3,00	0,62
<b>0,89%</b>	0,20	90000	0,80	0,0010	7000	0,30	0,0002	300	0,70	0,0420	0,55	0,74
<b>4,44%</b>	0,00	120000	0,35	0,0001	20000	0,10	0,0001	10000	0,30	0,0024	0,40	0,90
<b>6,67%</b>	0,00	50000	0,35	0,0001	20000	0,10	0,0003	10000	0,30	0,0005	0,80	1,00
<b>8,89%</b>	0,00	50000	0,35	0,0001	20000	0,10	0,0003	10000	0,30	0,0006	0,80	0,80

### 4.2.2 Grafitový prášek

Impedanční spektra vzorků AAA s grafitovým práškem (GP) jsou uvedena v přílohách (3a) až (4b). Mají podobný tvar, jako impedanční spektra vzorků se stejnou koncentrací CB, ale vykazují oproti nim často nižší fázový posun  $\varphi$  ve frekvenčním rozmezí (1–10 000) Hz. Z toho lze usoudit, že mají také podobné ekvivalentní obvody.

Parametry ekvivalentních obvodů a tím i dielektrické vlastnosti jednotlivých složek vzorků jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 17).

Výsledky měření první série vzorků AAA s CB ukazují na velké snížení hodnot elektrických vodivostí a kapacit jednotlivých složek pro jeden vzorek s 0,44 % GP v aluminosilikátové fázi (AF) zřejmě vlivem nehomogenit ve vzorku. Ty způsobují také snížení propojenosti vodivé sítě GP a zvýšení průměrných vzdáleností mezi řetězci GP, které elektrický proud v tomto vzorku překonává.

*Tabulka 17: Parametry ekvivalentních obvodů v podélného a příčného směru první a druhé série vzorků s GP získané matematickým modelováním*

Podélný směr	$R_1$ (M $\Omega$ )	$C_1$ (nF)	$n_{C1}$	$R_2$ (M $\Omega$ )	$C_2$ (nF)	$n_{C2}$	$R_3$ (M $\Omega$ )	$C_3$ (nF)	$n_{C3}$	$R_4$ (M $\Omega$ )	$C_4$ (nF)	$n_{C4}$
0,00%	4,50	35,00	0,50	0,22	8,00	0,65	0,93	0,08	0,76			
0,33%	4,5	1700,0	0,60	0,2	8,0	0,70	0,60	0,0	0,78	0,35	0,100	0,80
0,33%	1,5	4200,0	0,60	0,6	30,0	0,50	0,80	0,1	0,73	0,46	0,018	0,88
0,33%	3,2	1600,0	0,66	0,2	8,0	0,80	0,58	0,0	0,90	0,33	0,100	0,90
0,44%	25,0	32,0	0,60	3,4	8,0	0,70	6,70	0,1	0,70	4,20	0,080	0,80
0,44%	2,0	2500,0	0,62	0,2	30,0	0,56	0,21	0,3	0,73	0,13	0,100	0,84
0,44%	3,2	6000,0	0,63	0,1	8,0	0,75	0,38	0,1	0,90	0,19	0,100	0,90
0,89%	2,8	2500,0	0,70	0,1	20,0	0,60	0,10	0,4	0,72	0,09	0,090	0,85
1,11%	2,8	6000,0	0,60	0,1	20,0	0,60	0,10	0,4	0,72	0,09	0,090	0,85
1,78%	2,8	3600,0	0,68	0,2	20,0	0,60	0,08	0,4	0,72	0,09	0,090	0,85
2,22%	1,7	6000,0	0,68	0,2	20,0	0,60	0,07	0,2	0,72	0,07	0,090	0,85
2,67%	2,4	4000,0	0,70	0,2	20,0	0,60	0,05	0,4	0,72	0,05	0,120	0,85
3,33%	2,4	9000,0	0,64	0,2	45,0	0,52	0,05	0,4	0,70	0,05	0,080	0,85
4,44%	2,4	8000,0	0,70	0,3	35,0	0,57	0,05	0,5	0,70	0,05	0,140	0,82
6,67%	1,8	11000,0	0,68	0,2	60,0	0,57	0,03	0,7	0,70	0,03	0,180	0,82
8,89%	1,8	14000,0	0,70	0,3	80,0	0,52	0,03	0,7	0,70	0,03	0,250	0,82

Příčný směr	$R_1$ (MΩ)	$C_1$ (nF)	$n_{C1}$	$R_2$ (MΩ)	$C_2$ (nF)	$n_{C2}$	$R_3$ (MΩ)	$C_3$ (nF)	$n_{C3}$	$R_4$ (MΩ)	$C_4$ (nF)	$n_{C4}$
0,00%	4,50	35,00	0,50	0,22	8,00	0,65	0,93	0,08	0,76			
0,33%	2,5	3500	0,60	0,18	3,0	0,65	0,11	0,16	0,75	0,08	0,10	0,85
0,33%	1,3	8000	0,60	0,07	0,8	0,70	0,05	0,60	0,73	0,04	0,15	0,90
0,33%	2,5	75000	0,50	0,09	7,0	0,62	0,02	3,50	0,67	0,02	0,25	0,88
0,44%	2,0	2500	0,62	0,15	30,0	0,56	0,21	0,30	0,73	0,13	0,10	0,84
0,44%	1,3	5000	0,62	0,07	0,8	0,70	0,22	0,16	0,73	0,16	0,04	0,90
0,44%	2,5	75000	0,50	0,09	7,0	0,62	0,02	3,50	0,67	0,02	0,25	0,88
0,89%	2,80	2500	0,7	0,09	20	0,6	0,10	0,35	0,7	0,09	0,09	0,9
1,11%	2,80	6000	0,6	0,13	20	0,6	0,10	0,35	0,7	0,09	0,09	0,9
1,78%	2,80	3600	0,7	0,18	20	0,6	0,08	0,35	0,7	0,09	0,09	0,9
2,22%	1,70	6000	0,7	0,17	20	0,6	0,07	0,22	0,7	0,07	0,09	0,9
2,67%	2,40	4000	0,7	0,16	20	0,6	0,05	0,40	0,7	0,05	0,12	0,9
3,33%	2,40	9000	0,6	0,21	45	0,5	0,05	0,40	0,7	0,05	0,08	0,9
4,44%	2,40	8000	0,7	0,25	35	0,6	0,05	0,50	0,7	0,05	0,14	0,8
6,67%	1,80	11000	0,7	0,18	60	0,6	0,03	0,70	0,7	0,03	0,18	0,8
8,89%	1,80	14000	0,7	0,33	80	0,5	0,03	0,70	0,7	0,03	0,25	0,8

#### 4.2.3 Uhlíková vlákna

Impedanční spektra vzorků AAA s uhlíkovými vlákny (CF) jsou uvedena v přílohách (5a) až (6b). Mají podobný průběh, jako impedanční spektra vzorků CB, ale oproti nim vykazují menší odchylky mezi vzorky. Z toho lze usuzovat, že jejich ekvivalentní obvody jsou také podobné.

Parametry ekvivalentních obvodů a tím i dielektrické vlastnosti jednotlivých složek vzorků jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 18). Z výsledků je patrné, že permitivita klesá v řadě: křemenný písek, aluminosilikátová fáze (AF), roztok pórů a CF. Stanovené měrné elektrické vodivosti (konduktivity) jednotlivých složek první série vzorků se pohybují ve velmi širokém rozsahu, nicméně pro druhou sérii se zvyšují v pořadí: křemenný písek, AF, roztok pórů a CF. CPE, parametry  $n$  se zvyšují ve stejném pořadí.

Výsledky měření první série vzorků AAA s CF ukazují na velké snížení hodnot elektrických vodivostí a kapacit pro některé vzorky. To je způsobeno pravděpodobně zvýšenou nehomogenitou oproti dalším vzorkům a následným snížením propojenosti vodivé sítě, zvýšení aglomerace CF a zvýšení průměrných délek mezi CF, které musí elektrický proud v tomto vzorku překonávat.

Tabulka 18: Parametry ekvivalentních obvodů podélného a příčného směru první a druhé série vzorků s CF v podélném směru získané matematickým modelováním

Podélný směr	$R_1$ (MΩ)	$C_1$ (nF)	$n_{C1}$	$R_2$ (MΩ)	$C_2$ (nF)	$n_{C2}$	$R_3$ (MΩ)	$C_3$ (nF)	$n_{C3}$	$R_4$ (MΩ)	$C_4$ (nF)	$n_{C4}$
0,00%	4,50	35,00	0,50	0,22	8,00	0,65	0,93	0,08	0,76			
0,11%	2,0	1050,0	0,50	1,5	50,0	0,46	0,7	1,0	0,70	1,00	0,040	0,81
0,11%	4,0	280,0	0,50	5,0	50,0	0,46	3,5	1,0	0,68	6,00	0,018	0,81
0,11%	35,0	25,0	0,66	15,0	40,0	0,65	20,0	5,0	0,63	5,50	0,018	0,80
0,22%	10,0	200,0	0,60	24,5	1,5	0,70	2,7	2,5	0,65	4,20	0,022	0,82
0,22%	60,0	100,0	0,55	72,0	5,0	0,65	6,0	1,0	0,63	9,00	0,013	0,83
0,22%	60,0	20,0	0,65	90,0	2,0	0,88	50,0	0,6	0,81	6,00	0,012	0,95
0,33%	3,5	400,0	0,50	2,3	12,0	0,64	0,6	2,5	0,65	1,70	0,010	1,00
0,33%	27,0	150,0	0,50	8,0	5,0	0,70	32,0	0,2	0,68	18,00	0,008	0,84
0,33%	6,0	260,0	0,30	0,4	12,0	0,64	0,5	2,5	0,65	2,30	0,032	0,80
0,44%	2,5	1200,0	0,50	2,4	50,0	0,50	1,2	2,0	0,60	0,60	0,080	0,80
0,44%	45,0	40,0	0,50	18,0	8,0	0,68	29,0	0,2	0,77	11,00	0,006	0,92
0,44%	3,5	2200,0	0,45	1,8	55,0	0,55	0,9	2,5	0,62	0,64	0,180	0,76
0,56%	2,3	1000,0	0,55	1,7	12,0	0,60	0,7	2,5	0,65	0,70	0,060	0,80
1,11%	3,7	300,0	0,47	2,0	8,0	0,60	1,0	1,2	0,70	0,70	0,040	0,84
1,67%	18,0	22,0	0,47	1,0	6,0	0,65	0,8	2,0	0,68	0,80	0,020	0,92
2,22%	8,0	100,0	0,47	0,7	6,0	0,75	0,6	2,0	0,68	0,80	0,090	0,80
Příčný směr	$R_1$ (MΩ)	$C_1$ (nF)	$n_{C1}$	$R_2$ (MΩ)	$C_2$ (nF)	$n_{C2}$	$R_3$ (MΩ)	$C_3$ (nF)	$n_{C3}$	$R_4$ (MΩ)	$C_4$ (nF)	$n_{C4}$
0,00%	4,50	35,00	0,50	0,22	8,00	0,65	0,93	0,08	0,76			
0,11%	2,00	2500	0,50	1,30	30	0,50	0,10	12,0	0,50	0,13	0,330	0,50
0,11%	7,00	550	0,70	4,00	40	0,70	2,00	60,0	0,70	0,80	0,065	0,70
0,11%	95,00	13	0,50	25,00	4	0,50	9,00	0,40	0,50	3,00	0,030	0,50
0,22%	2,20	900	0,45	4,44	10	0,45	0,21	18,0	0,45	0,30	0,220	0,45
0,22%	4,00	80	0,50	2,80	10	0,50	0,50	7,00	0,50	1,20	0,030	0,50
0,22%	28,00	290	0,50	12,00	20	0,50	3,00	6,00	0,50	2,40	0,040	0,50
0,33%	1,00	5000	0,70	0,22	100	0,70	0,21	18,0	0,70	0,22	0,400	0,70
0,33%	4,00	900	0,70	2,00	170	0,70	2,00	1,60	0,70	1,40	0,070	0,70
0,33%	85,00	100	0,65	60,00	10	0,65	13,00	0,45	0,65	2,40	0,004	0,65
0,44%	2	1400	0,50	1	100,0	0,50	1,20	12,0	0,50	0,35	0,5	0,50
0,44%	400	8	0,70	1700	0,7	0,70	500,00	0,2	0,70	50,00	0,0	0,70
0,44%	12	400	0,50	11	15,0	0,50	12,00	1,6	0,50	0,50	0,3	0,50
0,56%	5	1000	0,50	3	40,0	0,50	2,70	9,0	0,50	0,25	0,4	0,50
1,11%	5	2000	0,50	2	40,0	0,50	2,00	12,0	0,50	0,40	0,2	0,50
1,67%	6	500	0,70	11	20,0	0,70	11,00	6,0	0,70	0,80	0,6	0,70
2,22%	6	500	0,70	12	20,0	0,70	12,00	6,0	0,70	0,80	0,6	0,70

#### 4.2.4 Uhlíkové nanotrubičky

Impedanční spektra vzorků AAA s CNT jsou uvedena v přílohách (7a) a (7b). Mají podobný průběh, jako impedanční spektra vzorků CB, ale vykazují oproti nim často vyšší fázový posun  $\varphi$  ve frekvenčním rozmezí (1–10 000) Hz. Vzorek s 0,1 % CNT v AF měl nejvyšší  $\varphi$ . V ekvivalentním obvodu je aluminosilikátová fáze (AF) zastoupena paralelním zapojením kondenzátoru a členu konstantního fázového posunu (CPE).

Parametry ekvivalentních obvodů a dielektrické vlastnosti jednotlivých složek vzorků jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 19). Z výsledků je patrné, že permitivita u většiny vzorků klesá v řadě: křemenný písek, AF, roztok pórů a CNT. Stanovené měrné elektrické vodivosti jednotlivých složek se zvyšují v pořadí: křemenný písek, AF, roztok pórů a CF (výjimku tvoří vzorek s 0,1 % CNT). Nejvyšší CPE parametr  $n$  měly CNT, a naopak nejnižší CPE parametr  $n$  měl odporový CPE křemenného písku.

Výsledky ukazují, že vzorek AAA s 0,1 % CNT vykazoval v porovnání s dalšími vzorky s CNT nejmenší iontovou vodivost a vodivost sítě CNT, což souviselo s nízkou propojeností vodivé sítě CNT.

*Tabulka 19: Parametry ekvivalentních obvodů měřených vzorků s CNT získané matematickým modelováním*

<b>Podélný směr</b>	<b><math>R_1</math> (M<math>\Omega</math>)</b>	<b><math>C_1</math> (nF)</b>	<b><math>n_{C1}</math></b>	<b><math>R_2</math> (M<math>\Omega</math>)</b>	<b><math>n_{R2}</math></b>	<b><math>C_2</math> (nF)</b>	<b><math>R_3</math> (M<math>\Omega</math>)</b>	<b><math>C_3</math> (nF)</b>	<b><math>n_{C3}</math></b>	<b><math>R_4</math> (M<math>\Omega</math>)</b>	<b><math>C_4</math> (nF)</b>	<b><math>n_{C4}</math></b>
<b>0,00 %</b>	8	200	0,66	7,0	0,38	3,0	3,4	0,7	0,67	0,10	0,020	1,00
<b>0,05 %</b>	45	30	0,70	25,0	0,33	6,0	20,0	0,4	0,68	0,10	0,050	1,00
<b>0,10 %</b>	18	0,2	0,75	4,5	0,20	10,0	2,0	0,8	0,84	6,00	0,019	1,00
<b>0,20 %</b>	5	70	0,64	3,5	0,42	7,0	5,0	1,8	0,65	0,13	0,018	0,98
<b>0,30 %</b>	3	2000	0,60	1,6	0,35	0,9	0,9	2,5	0,65	0,35	0,015	0,91
<b>0,40 %</b>	3	7000	1,00	1,2	0,21	0,1	0,8	1,8	0,70	0,20	0,040	0,90
<b>Příčný směr</b>	<b><math>R_1</math> (M<math>\Omega</math>)</b>	<b><math>C_1</math> (nF)</b>	<b><math>n_{C1}</math></b>	<b><math>R_2</math> (M<math>\Omega</math>)</b>	<b><math>n_{R2}</math></b>	<b><math>C_2</math> (nF)</b>	<b><math>R_3</math> (M<math>\Omega</math>)</b>	<b><math>C_3</math> (nF)</b>	<b><math>n_{C3}</math></b>	<b><math>R_4</math> (M<math>\Omega</math>)</b>	<b><math>C_4</math> (nF)</b>	<b><math>n_{C4}</math></b>
<b>0,00 %</b>	0,4	5000,0	0,60	0,1	0,33	2,5	1,0	0,0	0,95			
<b>0,05 %</b>	1,0	4000,0	0,45	0,1	0,33	2,5	0,7	0,3	0,82	1,30	0,012	0,88
<b>0,10 %</b>	10,0	800,0	0,45	1,0	0,33	10,0	7,5	0,4	0,75	5,50	0,023	0,82
<b>0,20 %</b>	1,8	2800,0	0,55	0,1	0,15	2,5	0,4	1,0	0,77	0,65	0,030	0,84
<b>0,30 %</b>	1,8	5000,0	0,62	0,1	0,15	2,5	0,2	1,0	0,77	0,65	0,030	0,84
<b>0,40 %</b>	1,8	4500,0	0,70	0,5	0,15	6,0	0,7	0,7	0,77	1,70	0,025	0,84

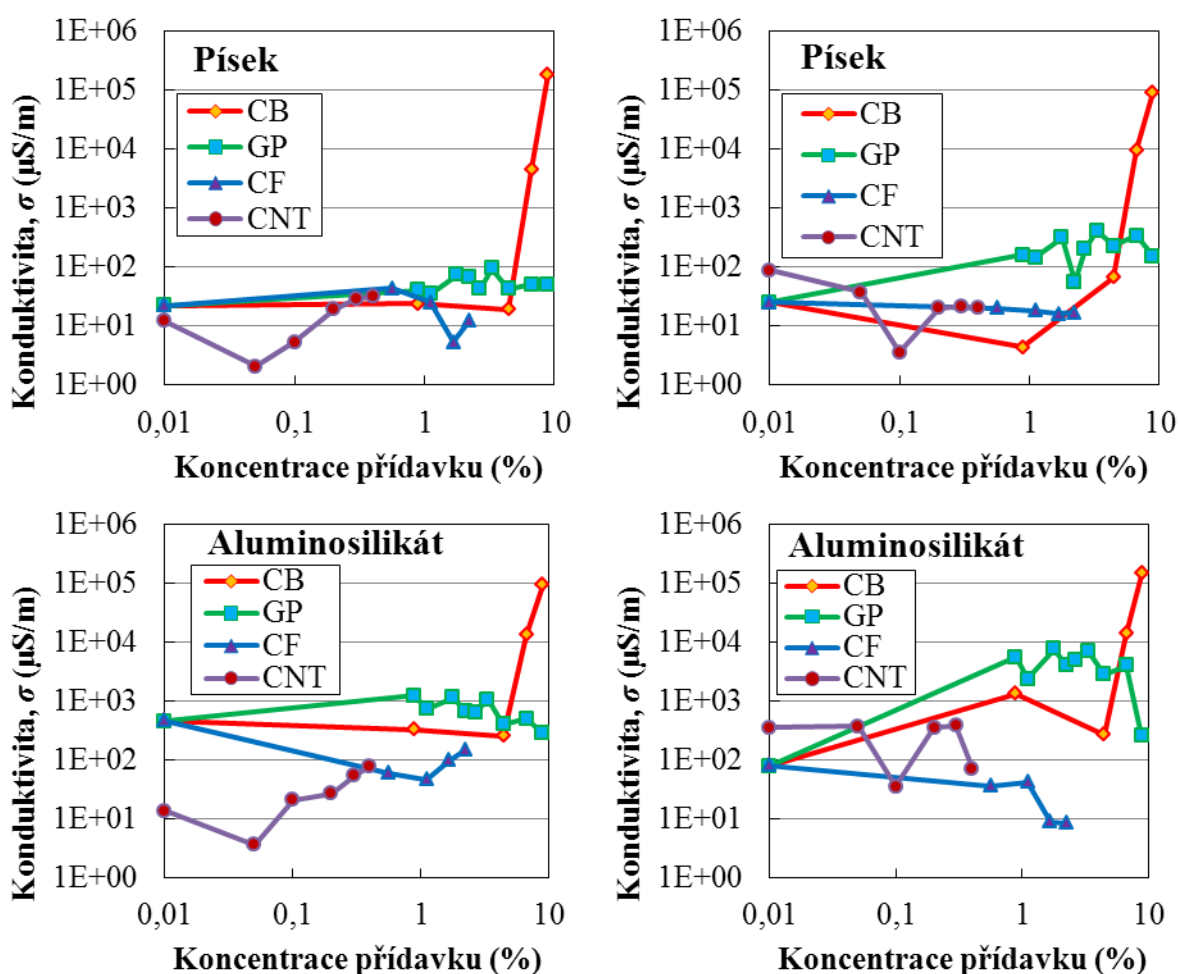


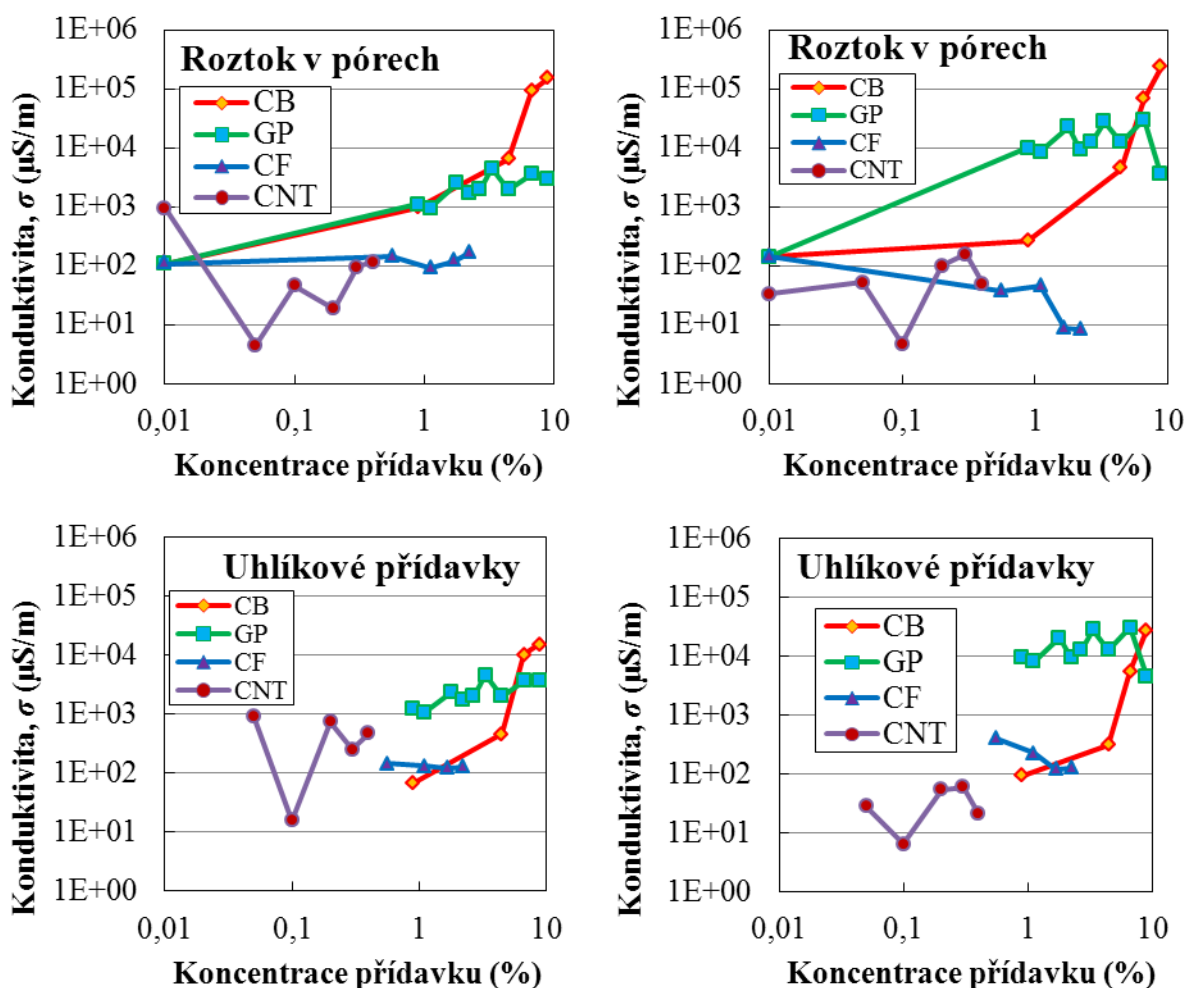
#### 4.2.5 Souhrn výsledků

V následujících grafech (Obr. 41 až Obr. 43) jsou uvedeny měrné elektrické vodivosti (konduktivity), elektrické permitivity a CPE parametry  $n$  jednotlivých fází kompozitních vzorků AAA vztažených k plochám elektrod a vzdálenostem mezi elektrodami. Referenční vzorky byly z důvodu použití logaritmického měřítka zobrazeny jako vzorky s 0,01 % uhlíkového přídatku. V přílohách (8a) až (11) jsou uvedeny sloupcové grafy těchto parametrů v podélném i příčném směru.

V závislostech měrných elektrických vodivostí (konduktivit) jednotlivých kompozitních složek na koncentracích uhlíkových přídatků na Obr. 41 lze pozorovat pro CB, GP a CNT stoupající trend pro všechny fáze vzorků. To je způsobeno zlepšením propojenosti vodivých sítí uhlíkových přídatků a zlepšením iontového vedení ostatními fázemi vlivem snížení průměrných vzdáleností mezi sousedními řetězci částic nebo vláken uhlíkových přídatků a tím i lepším obcházení iontových pastí při iontovém vedení. Naopak u přídatků CF dochází k opačnému jevu zřejmě vlivem jejich koagulace. Nejvyšších měrných elektrických vodivostí (konduktivit) bylo dosaženo u přídatku 6,67 % CB.

Měrné elektrické vodivosti (konduktivity) v podélném a příčném směru se vlivem nehomogenit a díky různé orientaci vláken přídatků CF a CNT liší. Závislosti elektrických vodivostí na koncentracích uhlíkových přídatků v rámci podélného nebo příčného směru mají podobný tvar pro křemenný písek, AF, roztok v pórech i uhlíkové přídatky.



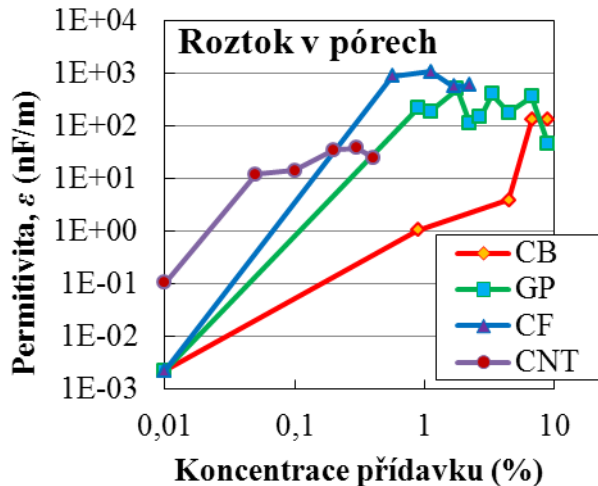
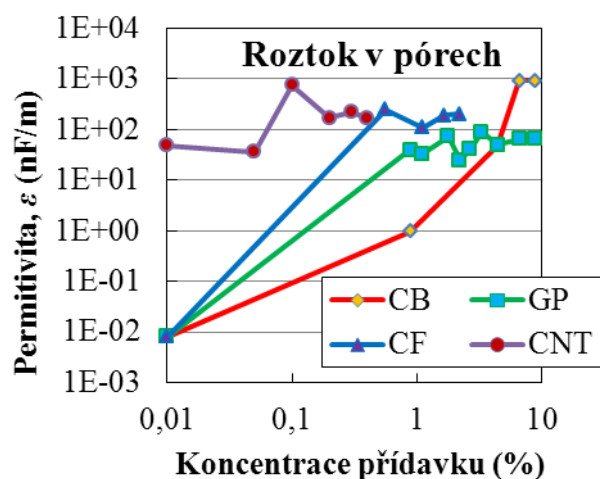
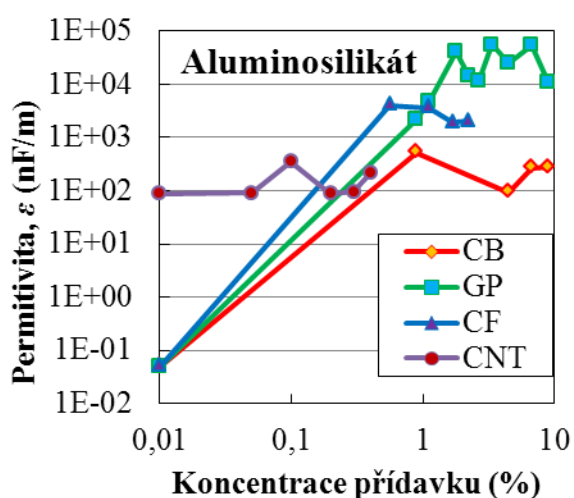
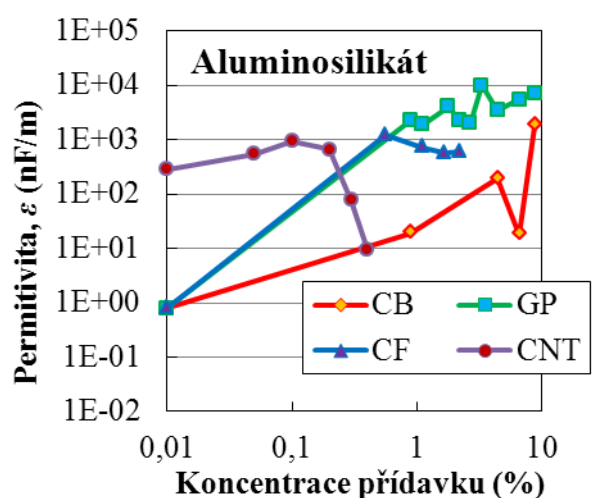
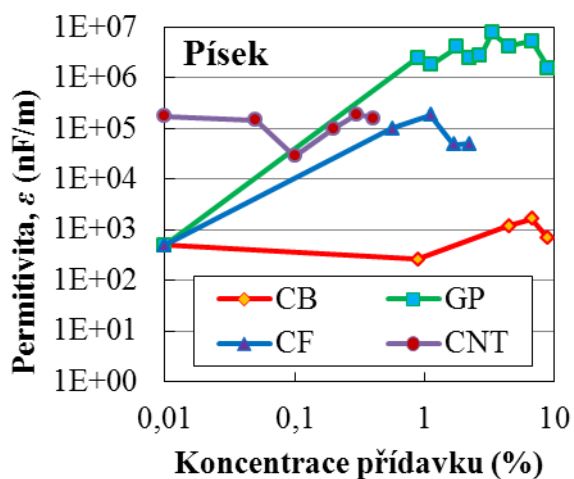
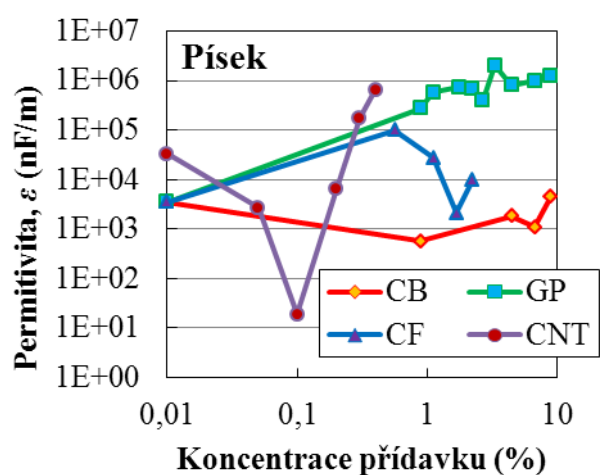


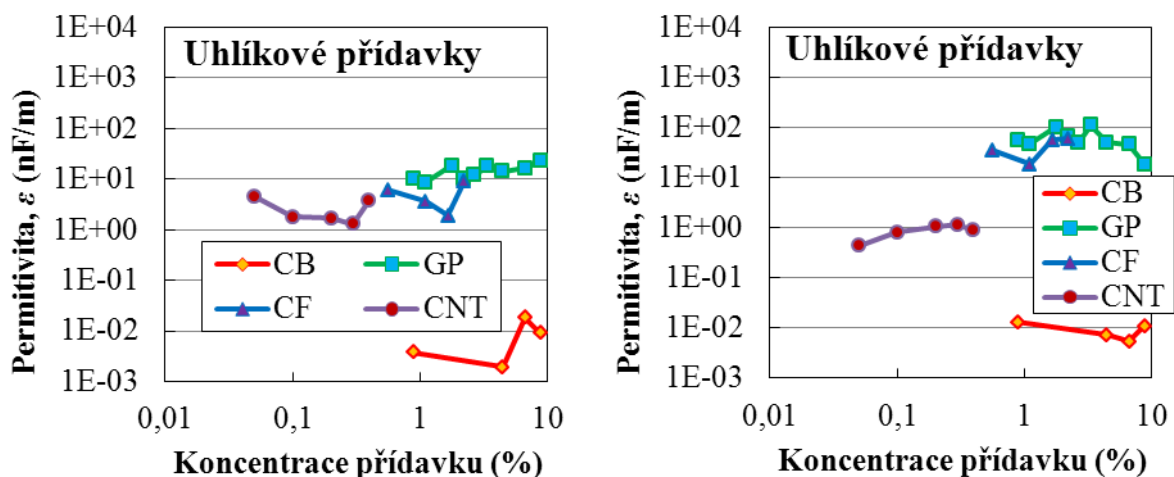
Obr. 41: Měrné elektrické vodivosti křemenného písku, aluminosilikátové fáze (AF), roztoku v pórech a uhlíkových přídavků vzorků alkalicky aktivovaných aluminosilikátů (AAA) s přídavky uhlíkových sazí (CB), grafitového prášku (GP), uhlíkových vláken (CF) a uhlíkových nanotrubiček (CNT) v podélném (vlevo) a příčném směru (vpravo)

V závislostech elektrických permitivit jednotlivých kompozitních fází vzorků na koncentracích uhlíkových přídavků na Obr. 46 lze pozorovat trend zvyšování permitivit všech fází vzorků vlivem přídavků CB, CF a GP s rostoucí měrou pro toto pořadí uhlíkových přídavků. Z toho lze usuzovat na snížení průměrných délek tras iontového vedení elektrického proudu nebo uhlíkovými vlákny, což usnadňuje uskladňování elektrického náboje v dalších fázích vzorků. Permitivity jednotlivých fází vzorků CNT často vykazovaly výkyvy, zřejmě vlivem možné jednosměrné orientace většiny částic CNT v různých směrech.

Permitivita jednotlivých fází vzorků klesala v pořadí: křemenný písek, aluminosilikátová fáze, roztok v pórech a uhlíkový přídavek.

Rozdíly mezi permitivitami jednotlivých fází vzorků CB, GP, CF a CNT v podélném a příčném směru mohou být způsobeny nehomogenitami ve vzorcích nebo různou směrovou orientací řetězců částic nebo vláken. Pro CNT mohou být tyto rozdíly i více, než tisícinásobné.

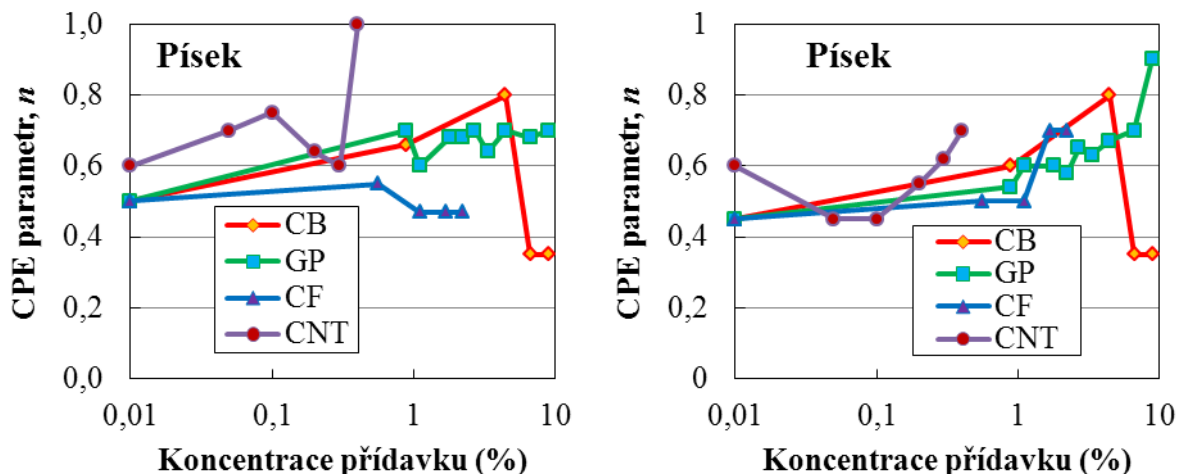


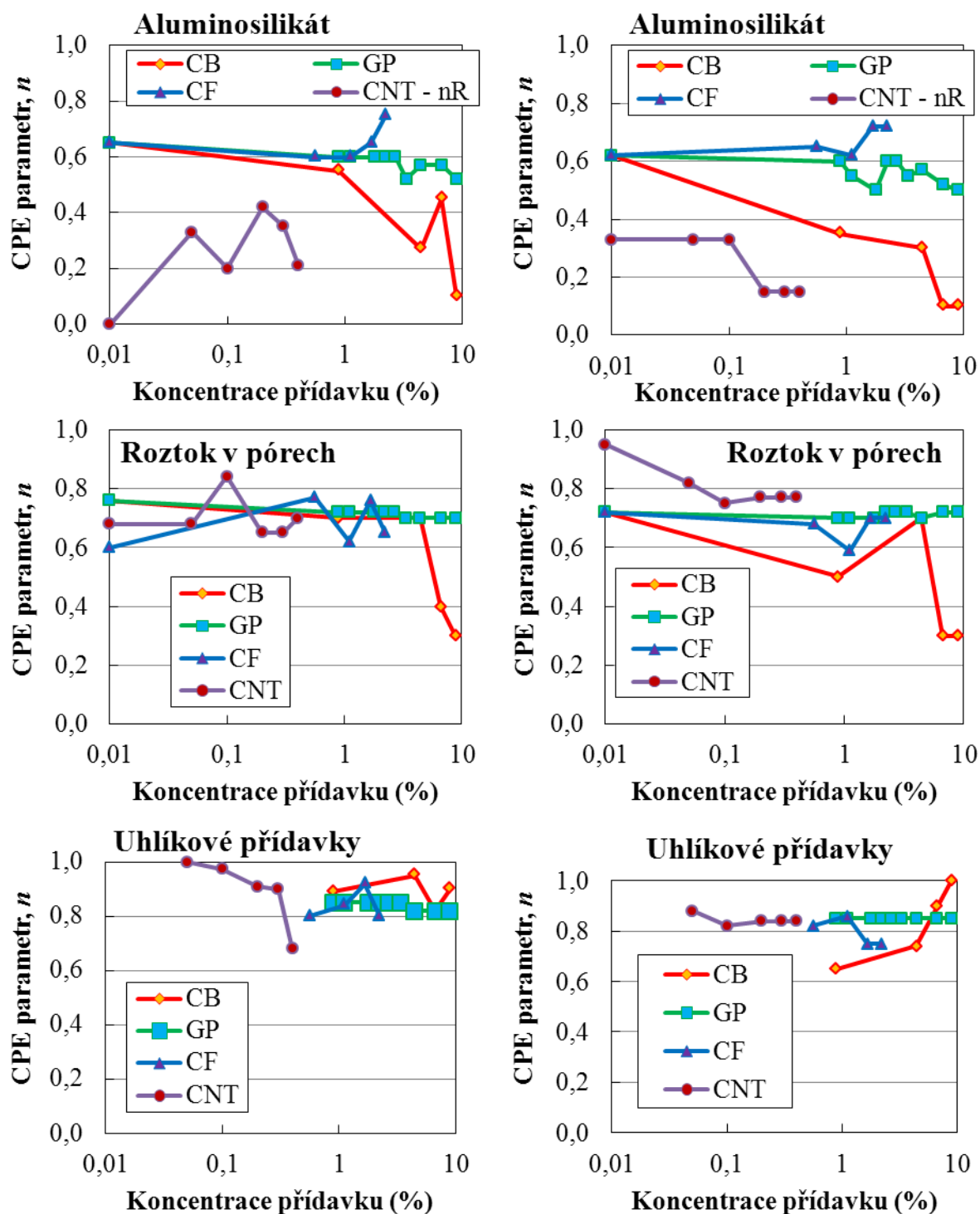


Obr. 42: Elektrické permitivity křemenného písku, aluminosilikátové fáze (AF), roztoku v pórech a uhlíkových přísadků vzorků alkalicky aktivovaných aluminosilikátů (AAA) s přísadky uhlíkových sazí (CB), grafitového prášku (GP), uhlíkových vláken (CF) a uhlíkových nanotrubiček (CNT) v podélném (vlevo) a příčném směru (vpravo)

CPE parametry  $n$  měly obvykle nejvyšší uhlíkové přísadky (viz Obr. 43). Vyjimku tvořily vzorky s přísadky CNT, kde v jednom případě dosahoval křemenný písek  $n = 1$  (ideálně kapacitní chování) a AF představovalo v ekvivalentním obvodu paralelní zapojení kondenzátoru (s  $n = 1$ ) a CPE s částečně kapacitním chováním.

Vzorky s 6,67 % a 8,89 % CB v AF měly nízké CPE parametry  $n$  křemenného písku, AF a roztoku v pórech a vysoké CPE parametry  $n$  CB zřejmě vlivem snížení podílu iontového vedení elektrického proudu oproti elektronovému vedení (u vzorku s 8,89 % CB v AF byl v příčném směru  $n = 1$ ).





Obr. 43: CPE parametry  $n$  křemenného písku, aluminosilikátové fáze (AF), roztoku v pórech a uhlíkových přídavků vzorků alkalicky aktivovaných aluminosilikátů (AAA) s přídavky uhlíkových sazí (CB), grafitového prášku (GP), uhlíkových vláken (CF) a uhlíkových nanotrubiček (CNT) v podélném (vlevo) a příčném směru (vpravo)

## 4.3 Tepelné vlastnosti

### 4.3.1 Uhlíkové saze

Na *Obr. 44* jsou uvedeny teplotní odezvy druhé série vzorků s uhlíkovými sazemi (CB) ve formě závislostí teplotních rozdílů vztažených k teplotě zdroje  $\Delta T$  na čase  $t$ . Ze závislostí  $\Delta T$  na čase byly stanoveny závislosti  $(dT/dt)$  na  $\Delta T$  a závislosti  $t(dT/dt)$  na  $\Delta T$ .

Nakonec byly určeny závislosti měrných tepelných kapacitací  $c$  na měrných tepelných konduktancích  $\lambda$ , dle vztahů z kapitoly 2.7

$$\lambda = \frac{P}{\Delta T} \frac{h}{S} \text{ a } c = \frac{P}{m} \frac{dt}{dT}, \quad (26)$$

ve kterých  $P$  je výkon tepelného zdroje,  $\Delta T$  je teplotní rozdíl vztažený k teplotě zdroje,  $h$  je vzdálenost teplotního senzoru od tepelného zdroje (šířka vzorku),  $S$  je plocha kterou prochází tepelný tok,  $t$  je čas ohřevu a  $m$  je hmotnost měřeného vzorku.

Ze závislostí  $\Delta T$  na čase první série vzorků AAA s CB (viz *Obr. 45*) lze díky rozdílům v dosažené  $\Delta T$  při stejné koncentraci CB určit, že měřené vzorky měly různá rozložení jednotlivých kompozitních fází (vzorky nebyly zcela homogenní).

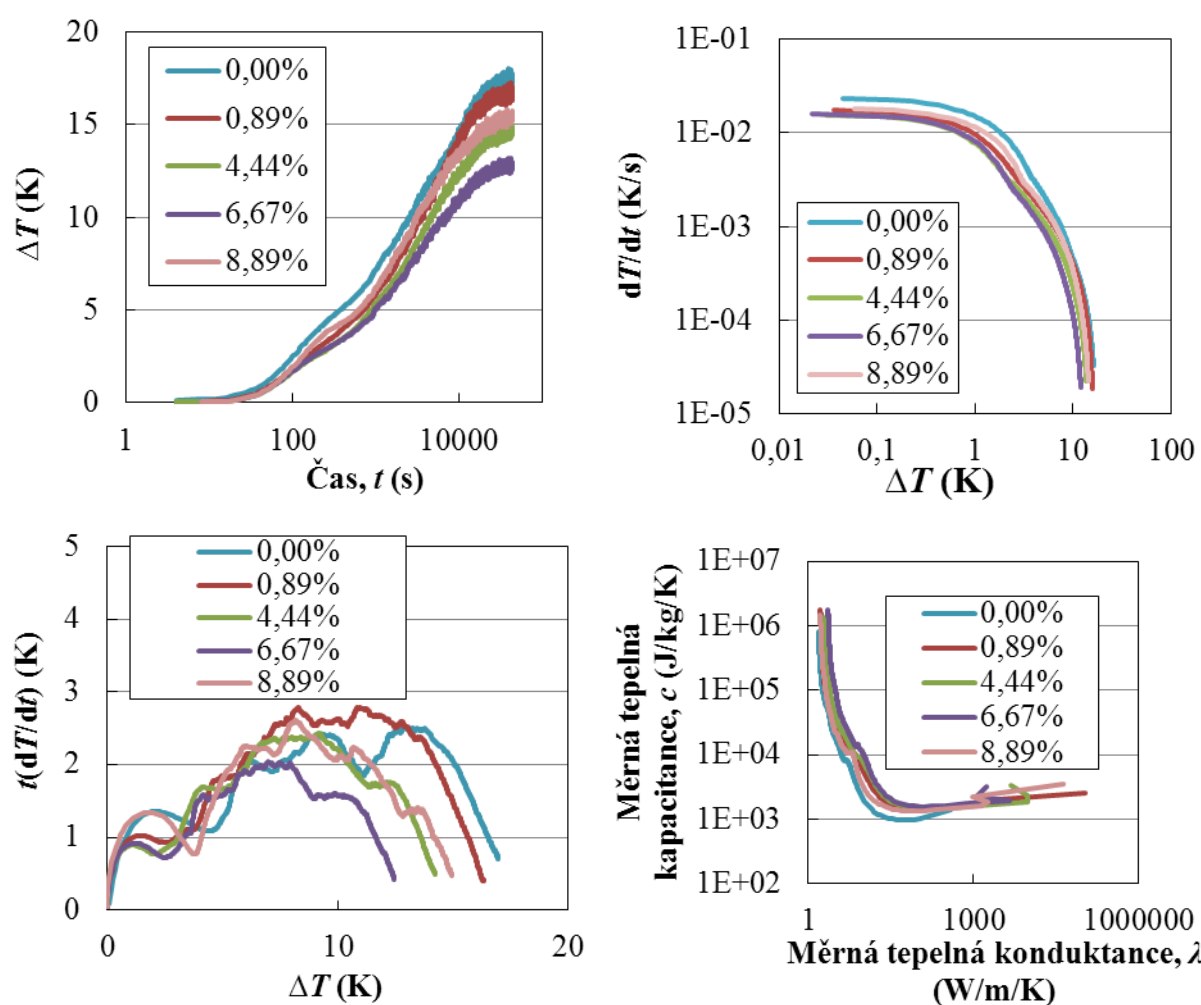
Ze závislostí  $\Delta T$  na čase pro druhou sérii vzorků AAA s CB lze určit, že nejnižší  $\Delta T$  v ustáleném stavu měl vzorek s 6,67 % CB a naopak nejvyšší  $\Delta T$  měl referenční vzorek. Nejvyšší  $\lambda$  měl tedy podle těchto závislostí vzorek s 6,67 % CB a naopak nejnižší  $\lambda$  měl referenční vzorek, což koresponduje s hodnotami stanovenými diferenciální metodou uvedenými v tabulce (Tabulka 20) a v grafech na *Obr. 46*.

Na závislostech  $(dT/dt)$  na  $\Delta T$  je vidět, že nejnižších hodnot  $(dT/dt)$  při různých  $\Delta T$  dosahoval vzorek s 6,67 % CB a naopak nejvyšších hodnot  $(dT/dt)$  dosahoval referenční vzorek.



Z charakteristik  $t(dT/dt)$  na  $\Delta T$  (analogických Cole-Cole diagramům impedančních měření) je zřejmé, že závislosti všech vzorků obsahují čtyři píky, které odpovídají vlivu oblastí vzorků se zvýšenými koncentracemi křemenného písku, aluminosilikátové fáze (AF), pórů s vodným roztokem nebo elektricky vodivé příměsi, v tomto případě CB (každá ze složek má totiž jiné hodnoty a poměr měrné tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity). Podobné píky lze pozorovat i v závislostech  $t(dT/dt)$  na  $\Delta T$  vzorků AAA s grafitovým práškem (GP), uhlíkovými vlákny (CF) a uhlíkovými nanotrubičkami (CNT, viz přílohy (14) – (17)) a znamená to, že homogenizace vzorků při jejich přípravě nebyla zcela dokonalá.

V závislostech  $c$  na  $\lambda$  měl nejvyšší měrnou tepelnou kapacitu vzorek s 6,67 % CB a naopak nejnižší tepelnou kapacitu měl referenční vzorek, což je ve shodě se stanovenými hodnotami uvedenými v tabulce (Tabulka 20) a na Obr. 46.

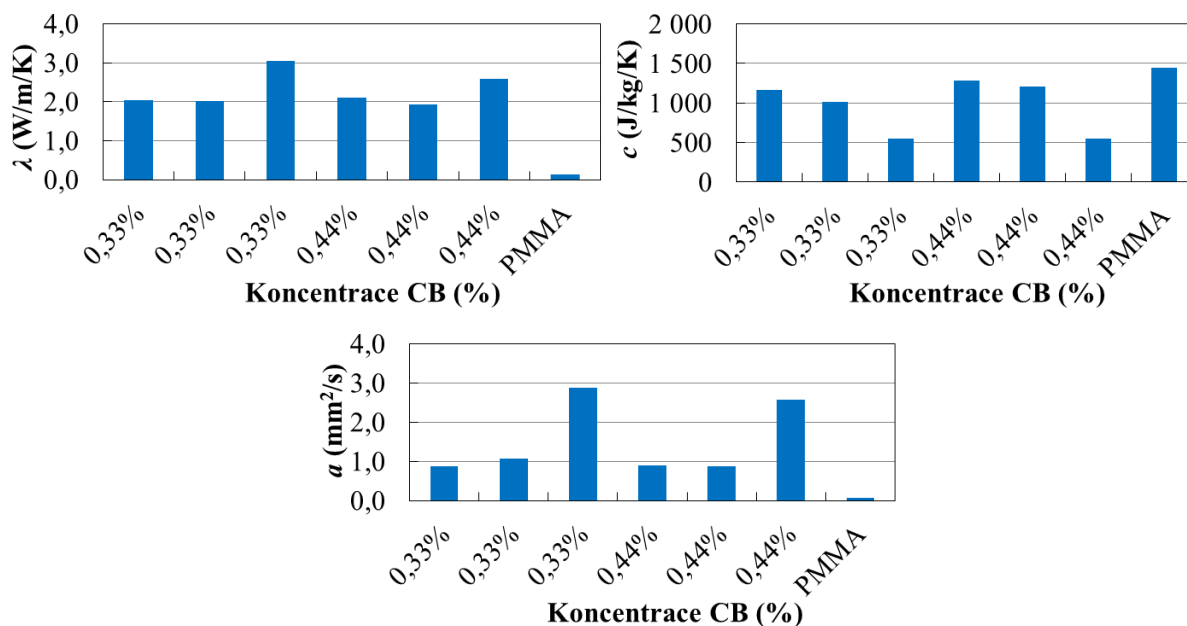


Obr. 44: Časové závislosti teplotních rozdílů mezi teplým a studeným povrchem ( $\Delta T$ ) (vlevo nahoře), závislosti  $dT/dt$  a  $\Delta T$  na čase (vpravo nahoře), závislosti  $t(dT/dt)$  na  $\Delta T$  (vlevo dole) a závislosti měrné tepelné kapacity  $c$  na měrné tepelné konduktanci  $\lambda$  (vpravo dole) druhé série vzorků AAA s CB a referenčního vzorku měřené v příčném směru

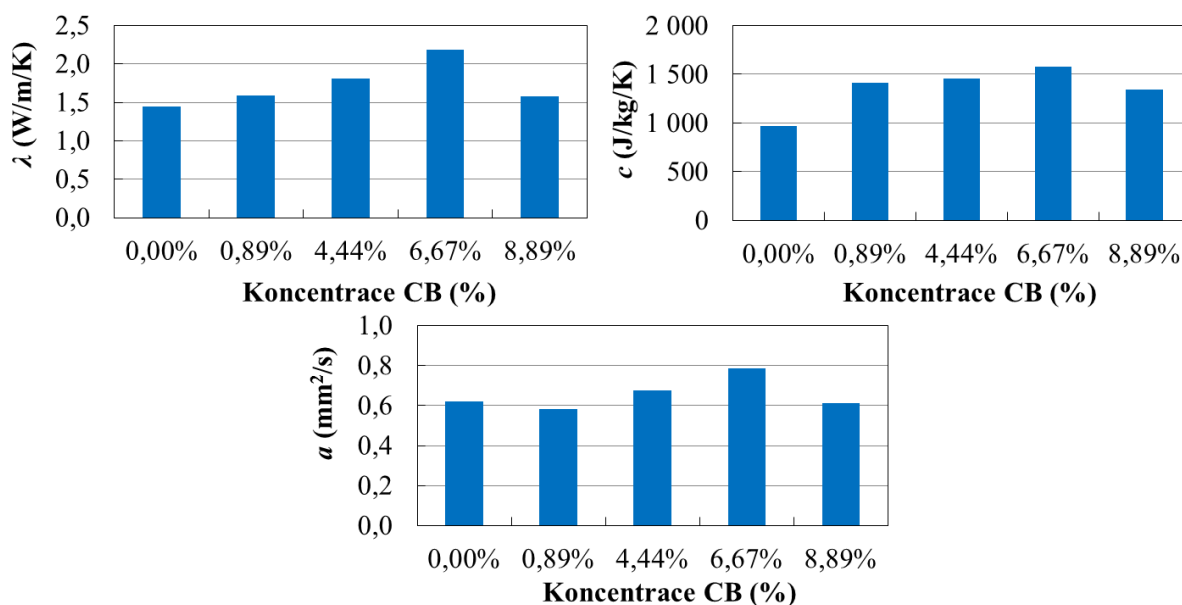
Z naměřených závislostí  $\Delta T$  na čase byly diferenciální metodou (viz kapitola 2.7) stanoveny měrné tepelné vodivosti, měrné tepelné kapacity a teplotní vodivosti. Výsledky jsou shrnuty v tabulce (Tabulka 20) a v grafech na Obr. 45 a Obr. 46. Rozdíly mezi měrnými tepelnými vodivostmi ( $\lambda$ ) a také rozdíly mezi měrnými tepelnými kapacitami ( $c$ ) různých vzorků jsou způsobeny nehomogenitami vzorků. Pro vyšší koncentrace CB jsou tyto rozdíly mezi vzorky menší. Z toho plyne, že vzorky s vyšší koncentrací CB měly mezi sebou menší rozdíly v rozložení fází z hlediska vedení a uchovávání tepla, než vzorky s 0,33 % nebo 0,44 % CB. K ověření správnosti výsledků použité metody měření byl použit vzorek polymethylmetakrylátu (PMMA) se známými tabelovanými hodnotami  $c = 0,17 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$  a  $\lambda = 1400 \text{ J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ . Stanovené hodnoty pro vzorek PMMA (viz Tabulka 20) jsou velmi blízké těmto tabelovaným hodnotám (odchylka je menší, než 10 %).

Tabulka 20: Tepelné parametry studovaných vzorků PMMA, první a druhé série vzorků AAA s CB

Koncentrace CB	$\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$\Delta T$ (K)	$t_D$ (s)	$a$ ( $\text{mm}^2\text{s}^{-1}$ )	$c$ ( $\text{J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	$\lambda$ ( $\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
PMMA	1186	30,25	62	0,108	1444	0,185
0,00%	2407	18,01	38	0,621	971	1,451
0,33%	1987	16,80	45	0,880	1160	2,029
0,33%	1871	17,36	43	1,068	1007	2,012
0,33%	1929	19,62	47	2,886	548	3,053
0,44%	1831	13,62	35	0,895	1286	2,108
0,44%	1818	15,60	38	0,877	1204	1,920
0,44%	1852	22,10	48	2,574	545	2,597
0,89%	1940	17,28	45	0,581	1408	1,587
4,44%	1834	15,15	42	0,678	1452	1,805
6,67%	1764	13,19	36	0,785	1579	2,186
8,89%	1912	15,85	38	0,612	1345	1,575



Obr. 45: Závislosti měrné tepelné vodivosti  $\lambda$  (vlevo nahoře), měrné tepelné kapacity  $c$  (vpravo nahoře) a teplotní vodivosti  $a$  (dole) na koncentraci CB první řady vzorků s CB a vzorku PMMA



Obr. 46: Závislosti měrné tepelné vodivosti  $\lambda$  (vlevo nahoře), měrné tepelné kapacity  $c$  (vpravo nahoře) a teplotní vodivosti  $a$  (dole) na koncentraci CB druhé řady vzorků s CB a referenčního vzorku

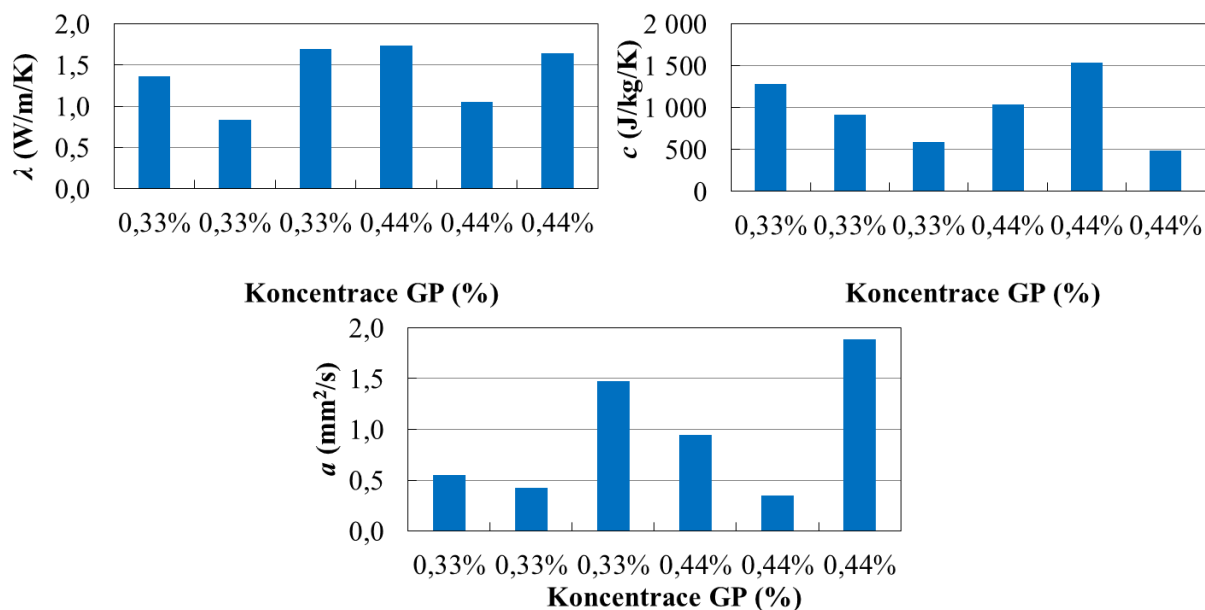
### 4.3.2 Grafitový prášek

Teplotní odezvy (závislosti  $\Delta T$  na čase), závislosti  $(dT/dt)$  na  $\Delta T$ ,  $t(dT/dt)$  na  $\Delta T$  a závislosti měrné tepelné kapacity  $c$  na měrné tepelné vodivosti  $\lambda$  pro vzorky AAA s grafitovým práškem (GP) jsou uvedeny v přílohách (14) a (15). Tyto závislosti mají podobný průběh a hodnoty, jako u vzorků se stejnou nebo podobnou koncentrací uhlíkových sazí (CB), oproti nim však vykazují vyšší procentuální rozdíly hodnot mezi vzorky. To je zřejmě dáno podobností částic CB a GP.

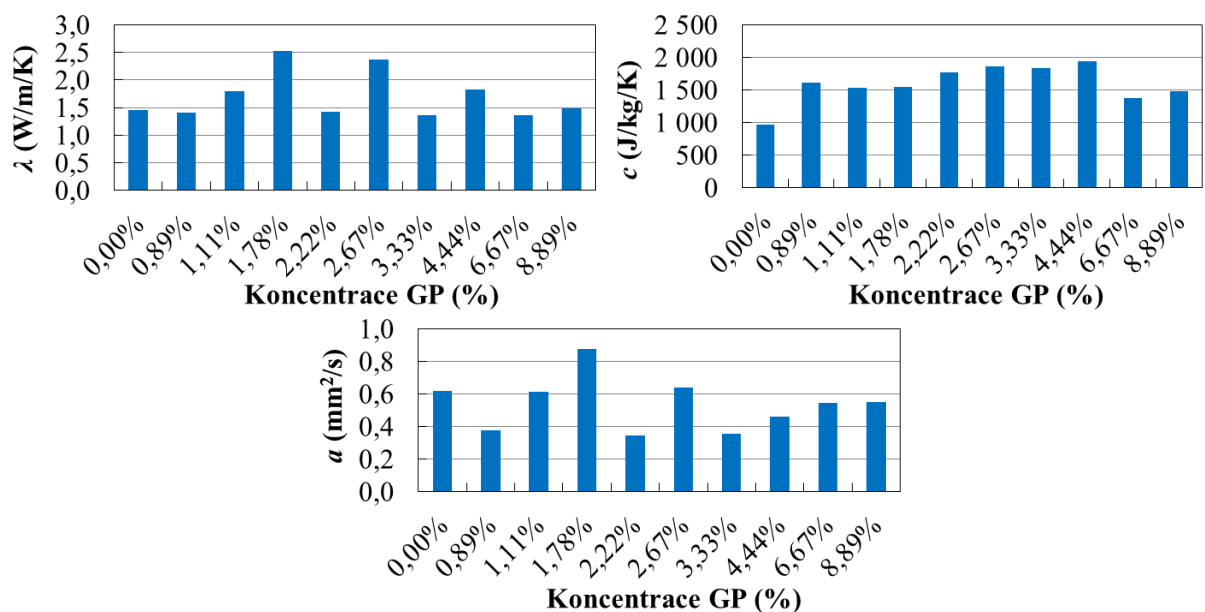
Z naměřených závislostí  $\Delta T$  na čase byly diferenciální metodou stanoveny měrné tepelné vodivosti, měrné tepelné kapacity a teplotní vodivosti změřených vzorků AAA s GP. Výsledky jsou shrnuty v tabulce (Tabulka 21) a v grafech na Obr. 47 a Obr. 48. Rozdíly hodnot  $\lambda$  a  $c$  mezi vzorky zde způsobovaly nehomogenity vzorků. Pro druhou řadu vzorků s GP byly tyto rozdíly kromě určitých výjimek menší, z toho plyne, že vzorky s vyšší koncentrací GP měly mezi sebou menší rozdíly v rozložení kompozitních složek z hlediska  $c$  a  $\lambda$ , než vzorky s 0,33 % a 0,44 % GP v aluminosilikátové fázi (AF).

Tabulka 21: Tepelné parametry první a druhé řady vzorků AAA s GP, referenčního vzorku a druhé série vzorků AAA s GP

Koncentrace GP	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta T$ (K)	$t_D$ (s)	$a$ (mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	$c$ (J.kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	$\lambda$ (W.m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
0,00%	2407	18,01	38	0,621	971	1,451
0,33%	1947	20,04	52	0,548	1278	1,365
0,33%	2174	33,53	69	0,421	914	0,836
0,33%	1947	35,48	85	1,473	591	1,694
0,44%	1773	19,53	42	0,949	1033	1,739
0,44%	1971	29,78	99	0,348	1537	1,053
0,44%	1802	38,06	72	1,884	485	1,647
0,89%	2319	16,74	50	0,376	1612	1,405
1,11%	1908	15,32	42	0,611	1536	1,790
1,78%	1867	11,99	32	0,876	1540	2,521
2,22%	2320	17,40	55	0,346	1770	1,422
2,67%	1999	11,05	36	0,637	1856	2,363
3,33%	2095	20,26	65	0,353	1833	1,356
4,44%	2041	14,32	51	0,462	1937	1,825
6,67%	1820	21,06	52	0,545	1374	1,365
8,89%	1825	18,39	50	0,550	1481	1,487



Obr. 47: Závislosti měrné tepelné vodivosti  $\lambda$  (vlevo nahoře), měrné tepelné kapacity  $c$  (vpravo nahoře) a teplotní vodivosti  $a$  (dole) na koncentraci GP pro první řadu vzorků s GP



Obr. 48: Závislosti měrné tepelné vodivosti  $\lambda$  (vlevo nahoře), měrné tepelné kapacity  $c$  (vpravo nahoře) a teplotní vodivosti  $a$  (dole) na koncentraci GP druhé řady vzorků s GP a referenčního vzorku

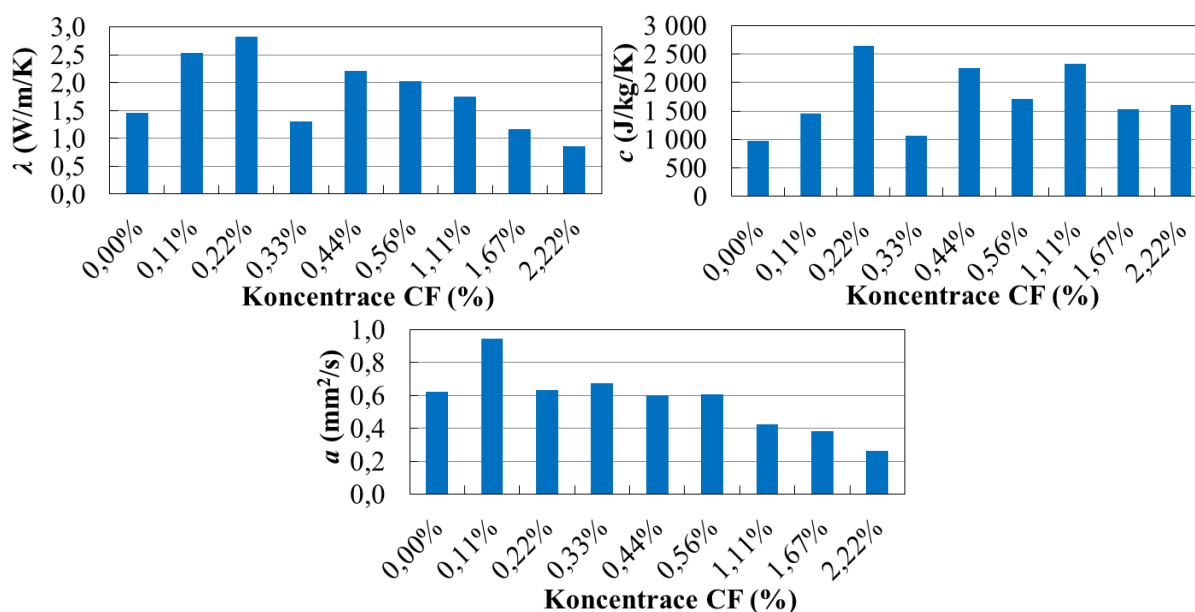
### 4.3.3 Uhlíková vlákna

Teplotní odezvy, závislosti  $t(dT/dt)$  na  $\Delta T$ , závislosti fázového posunu  $\varphi$  mezi tepelným výkonem a  $\Delta T$  na čase a závislosti  $c$  na  $\lambda$  pro vzorky AAA s GP jsou uvedeny v příloze (16). Tyto závislosti mají podobný průběh, jako u vzorků CB, oproti nim však vykazují vyšší procentuální rozdíly mezi různými vzorky a také větší píky.

Z naměřených závislostí  $\Delta T$  na čase byly diferenciální metodou vypočítány měrné tepelné vodivosti, měrné tepelné kapacity a teplotní vodivosti. Výsledky jsou shrnuty v tabulce (Tabulka 22) a v grafech na Obr. 49. Rozdíly mezi měrnými tepelnými vodivostmi vzorků a také měrnými tepelnými kapacitami jsou způsobeny rozdíly v rozložení kompozitních fází vzorků. Závislost měrné tepelné vodivosti na koncentraci CF má zezáčátku zvyšující se tendenci díky vysoké měrné tepelné vodivosti CF, ale mezi 0,44 % CF a 2,22 % CF v aluminosilikátové fázi (AF) tato závislost pravděpodobně díky koagulaci CF klesá.

Tabulka 22: Tepelné parametry prvního, třetího, šestého a osmého vzorku první řady vzorků s CF, druhé řady vzorků s CF a referenčního vzorku

Koncentrace GP	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta T$ (K)	$t_D$ (s)	$a$ (mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	$c$ (J.kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	$\lambda$ (W.m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
0,00%	2407	18,01	38	0,621	971	1,451
0,11%	1838	12,36	36	0,946	1459	2,537
0,22%	1689	9,68	46	0,631	2651	2,827
0,33%	1824	22,84	50	0,673	1065	1,306
0,44%	1622	13,54	47	0,602	2257	2,204
0,56%	1959	12,87	39	0,605	1713	2,030
1,11%	1779	15,66	66	0,422	2325	1,746
1,67%	1995	23,58	66	0,381	1535	1,167
2,22%	2030	30,51	91	0,262	1613	0,856



Obr. 49: Závislosti měrné tepelné vodivosti  $\lambda$  (vlevo nahoře), měrné tepelné kapacity  $c$  (vpravo nahoře) a teplotní vodivosti  $a$  (dole) na koncentraci CF referenčního vzorku, prvního, třetího, šestého a osmého vzorku první řady vzorků s CF a druhé řady vzorků s CF



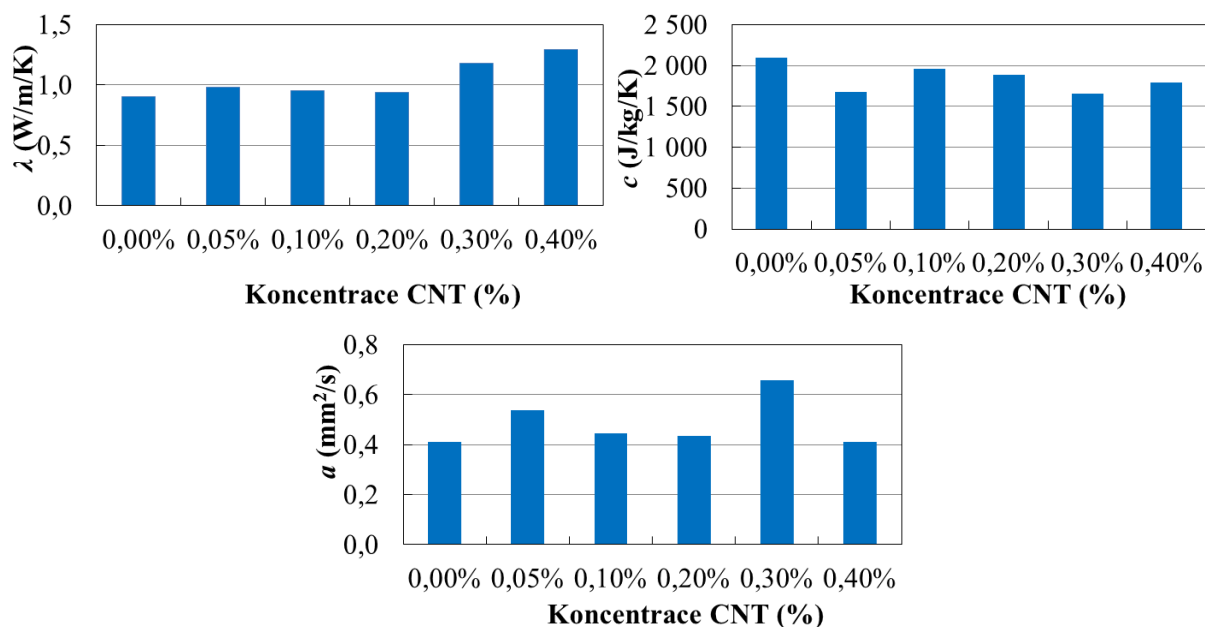
#### 4.3.4 Uhlíkové nanotrubičky

Teplotní odezvy, závislosti  $t(dT/dt)$  na  $\Delta T$ , závislosti fázového posunu  $\varphi$  mezi tepelným výkonem a  $\Delta T$  na čase a závislosti měrné tepelné kapacity  $c$  na měrné tepelné vodivosti  $\lambda$  pro vzorky AAA s CNT jsou uvedeny v příloze (17). Tyto závislosti jsou však svými tvary a svými hodnotami jsou odlišné od stejných závislostí vzorků s uhlíkovými sazemí (CB), grafitovým práškem (GP) a uhlíkovými vlákny (CF).

Z naměřených závislostí  $\Delta T$  na čase byly diferenciální metodou vypočítány měrné tepelné vodivosti, měrné tepelné kapacity a teplotní vodivosti pro měřené vzorky AAA s CNT. Výsledky jsou shrnuty v tabulce (Tabulka 23) a v grafech na Obr. 50. Rozdíly mezi měrnými tepelnými vodivostmi vzorků, měrnými tepelnými kapacitami a teplotními vodivostmi způsobené nehomogenitami vzorků byly mnohem nižší, než pro vzorky s CB, GP a CF. Měřené vzorky s CNT (a také referenční vzorek pro CNT) měly také mnohem nižší měrné tepelné vodivosti oproti vzorkům s CB, GP a CF.

Tabulka 23: Tepelné parametry studovaných vzorků AAA s CNT

Koncentrace CNT	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta T$ (K)	$t_D$ (s)	$a$ (mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	$c$ (J.kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	$\lambda$ (W.m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
0,00 %	1851	30,24	64	0,410	2101	0,907
0,05 %	1898	29,26	52	0,538	1681	0,982
0,10 %	1908	30,03	65	0,444	1955	0,957
0,20 %	1867	32,20	65	0,436	1887	0,939
0,30 %	1898	26,78	48	0,658	1658	1,180
0,40 %	1999	36,87	71	0,410	1788	1,298



Obr. 50: Závislosti měrné tepelné vodivosti  $\lambda$  (vlevo nahoře), měrné tepelné kapacity  $c$  (vpravo nahoře) a teplotní vodivosti  $a$  (dole) na koncentraci CNT v aluminosilikátové fázi (AF)

## 5 ZÁVĚR

Dizertační práce se zabývá studiem alkalicky aktivovaných aluminosilikátů (AAA) se zvýšenou elektrickou vodivostí a možnostmi jejich využití ve stavebních aplikacích. V teoretické části práce je uveden základ problematiky AAA a také AAA se zvýšenou elektrickou vodivostí. V experimentální části práce jsou uvedeny výsledky měření elektrických, dielektrických a tepelných vlastností vzorků AAA s různými koncentracemi uhlíkových sazí (CB), grafitového prášku (GP), uhlíkových vláken (CF) nebo uhlíkových nanotrubiček (CNT) a také jejich vyhodnocení.

Díky hromadění aglomerátů CB a částic GP na povrchu aluminosilikátů lze tyto materiály využít k výrobě černě zbarvených povrchů, které by snižovaly náklady na vytápění díky přeměně dopadajícího světla na tepelnou energii.

AAA kompozity s CNT a referenční vzorek pro CNT vykazovaly vysokou povrchovou tvorbu bílých povlaků (výkvětů), což znamená, že v jejich struktuře bylo velké množství volných  $\text{Na}^+$  a jiných pohyblivých kationtů.

Nejvyšší měrné elektrické vodivosti dosahovaly AAA s přídavkem CB. Vzorek s 6,67 % CB, dosahoval měrné elektrické vodivosti přes 0,01 S/m, a přiblížil se tak dobré použitelnosti v objemovém vytápění, sních rozpouštějících a odmrazujících systémech. Užití CB v AAA je také vhodné pro elektromagnetické stínění.

AAA s GP oproti tomu vykazovaly jen mírně zvýšenou měrnou elektrickou vodivost a podobné dielektrické vlastnosti oproti referenčnímu vzorku a se stoupající koncentrací GP se tyto vlastnosti příliš neměnily. Perkolační prahu bylo dosaženo při 0,89 % GP. Pro využití AAA s přídavkem GP za účely elektrického vytápění, sních rozpouštějících a odmrazujících systémů je potřeba zlepšit dispergaci částic GP. GP má také vyšší cenu v porovnání s CB.

AAA s CF vykazovaly nižší měrnou elektrickou vodivost, než referenční vzorek, podobné dielektrické vlastnosti, referenční vzorek a velké rozdíly hodnot tepelných vodivostí. Konduktivita referenčního vzorku byla vysoká. Pro další využití AAA s CF jako elektricky vodivých betonů (ECC) je potřeba zdokonalit proces dispergace při jejich výrobě.

Pro využití AAA s CNT jako ECC je potřeba pro jejich zvýšit jejich koncentraci v aluminosilikátové fázi nad 0,4 %, při této koncentraci bylo dosaženo perkolačního prahu.

Naměřené elektrické konduktivity vzorků AAA s uhlíkovými přídavky jsou ve shodě s výsledky měření dielektrických vlastností a elektrické konduktivity vzorků AAA s CB, GP a CF jsou také podobné elektrickým konduktivitám dalších vzorků připravených stejným postupem, stanovených na Fakultě stavební Českého vysokého učení technického v Brně (kromě referenčního vzorku s anomálně vysokou elektrickou konduktivitou). Maximální dosažená elektrická konduktivita pro různé druhy uhlíkových částic klesala v pořadí: CB, GP a vláknové příměsi (CF a CNT).

Vyhodnocením elektrických a dielektrických vlastností vzorků AAA s CNT bylo zjištěno, že přidavkem 0,1 % CNT dochází k výraznému úbytku volných iontů ve struktuře aluminosilikátové fáze a tím také i k velkému snížení měrné elektrické vodivosti a permitivity materiálu. Toto lze vysvětlit zvýšením krystalinity aluminosilikátové fáze (AF) vlivem přidavku CNT, který ovlivňuje alkalickou aktivaci (geopolymerizaci). Zjištěný efekt se nicméně při dalším zvyšování koncentrace CNT pravděpodobně vlivem koagulace částic CNT snižuje. Tímto lze vysvětlit také více, než 20% nárůst pevnosti v tlaku při 0,1 % CNT v AF oproti referenčnímu vzorku u podobně vyrobené série vzorků CNT. Přídavek 0,1 % CNT do AF při výrobě AAC může být tudíž vhodný pro zvýšení pevnosti materiálu a snížení množství vznikajících trhlin také díky zpevňujícímu efektu CNT.

Připravené AAA kompozity s CNT také vykazovaly nižší hodnoty měrné tepelné vodivosti přibližně  $1 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ , než vzorky s CB, GP a CF. To je při stavebních aplikacích výhodné díky úspoře energie potřebné k vytápění. Nižší měrná tepelná vodivost je pravděpodobně způsobena menší koncentrací křemenného písku v materiálu. Naopak vyšší měrné tepelné vodivosti vzorků s CB, GP a CF znamenají zase výhodu při elektrickém objemovém vytápění.

Závislost tvaru V-A charakteristik vzorků s CB, GP a CF na polaritě kolmého elektrického pole dokazuje nehomogenitu těchto vzorků. Touto nehomogenitou se dají vysvětlit také velké rozdíly v elektrických konduktivitách, permitivitách, měrných tepelných vodivostech a měrných tepelných kapacitách mezi různými vzorky. Díky vysoké nehomogenitě nelze tyto vyrobené materiály zatím doporučit pro výrobu senzorů vlhkosti, tlaku nebo trhlin. Naopak vzorky s CNT byly podle těchto parametrů oproti vzorkům s CB, GP a CF mnohem homogennější a tudíž je možné vyrobený alkalicky aktivovaný aluminosilikát s 0,4 % CNT (perkolační práh) zvážit pro tyto senzorické aplikace.

Bylo dokázáno, že měření V-A charakteristik s použitím dostatečně vysokého napětí lze využít pro určení dominantnosti iontové nebo elektronové vodivosti v AAA s elektricky vodivým přidavkem (například CB, GP, CF nebo CNT) díky tomu, že elektronová vodivost je lineární, zatímco iontová vodivost je nelineární (se stoupajícím napětím roste pohyblivost volných iontů ve struktuře AAA). Dále s pomocí impedanční spektroskopie lze analyzovat elektrické konduktivity, permitivity a CPE parametry  $n$  (parametry členů konstantních fázových posunů) jednotlivých složek těchto kompozitních směsí. Měřením tepelných vlastností lze získat informace o oblastech vzorku obohacených o různé složky AAA kompozitu. Optickou mikroskopií potom lze monitorovat rozložení fází na různých místech povrchu na povrchu alkalicky aktivovaného aluminosilikátu. Měření elektrických, dielektrických, tepelných nebo optických vlastností lze tak využít pro kontrolu průmyslových výrob alkalicky aktivovaných betonů z hlediska kontroly homogenity vyrobeného materiálu nebo s využitím matematických modelů také pro odhad stupně zesíťování jeho polymerní sítě a předpokládaných mechanických vlastností.

## 6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] LODEIRO-GARCIA, I., A. FERNANDEZ-JIMENEZ, P. PENNA a A. PALOMO. Alkaline activation of synthetic aluminosilicate glass. *Ceramics International*. **2014**, 40(4), 5547–5558. DOI: 10.1016/j.ceramint.2013.10.146. ISSN 02728842. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272884213014181>
- [2] Lukáš FIALA, Jan TOMAN, Jan VODICKA a Václav RACEK. Experimental Study on Electrical Properties of Steel-fibre Reinforced Concrete. *Procedia Engineering*. **2016**, 151, 241–248. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.362. ISSN 18777058. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705816317507>
- [3] Baoguo HAN, Siqi DING a Xun YU. Intrinsic self-sensing concrete and structures: A review. *Measurement*. **2015**, 59, 110–128. DOI: 10.1016/j.measurement.2014.09.048. ISSN 02632241. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S026322411400428X>
- [4] D. D. L CHUNG. Electrically conductive cement-based materials. *Advances in cement research*. **2004**, 16(4), 167–176. Dostupné z: <https://www.icvirtuallibrary.com/doi/pdf/10.1680/adcr.2004.16.4.167>
- [5] Michal TATARKOVIC, Gabriela BRONCOVA a Martin KRONDAK. 2012. Elektroimpedanční spektroskopie a její využití v chemické analýze. *Chemické listy*. **2012**(11), 1067–1074. ISSN 1213-7103. Dostupné z: [http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2012\\_11\\_1067-1074.pdf](http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2012_11_1067-1074.pdf)
- [6] Lucie TRHLIKOVA, Oldrich ZMESKAL, Petr PSENCIK a Pavel FLORIAN. Study of the thermal properties of filaments for 3D printing. *AIP Conference Proceedings*. **2016**, 040027, 1–6. DOI: 10.1063/1.4955258. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4955258>
- [7] Lucie TRHLIKOVA, Oldrich ZMESKAL, Radek PRIKRYL a Pavel FLORIAN. Thermal Properties of Mannitol Derivative. *Advanced Materials Research*. **2015**, 1126, 181–186. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1126.181. ISSN 1662-8985. Dostupné z: <http://www.scientific.net/AMR.1126.181>
- [8] Pavel FLORIAN, Katerina VALENTOVA, Lukas FIALA a Oldrich ZMESKAL. Thermal properties of alkali-activated aluminosilicates. *AIP conference proceedings*. **2017**, 040012, 1–6. DOI: 10.1063/1.4994492. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4994492>
- [9] Oldrich ZMESKAL, Lucie TRHLIKOVA, Lukas FIALA, Pavel FLORIAN a Robert CERNY. Thermal properties of alkali-activated aluminosilicates with CNT admixture. *AIP conference proceedings*. **2017**, 150011, 1–5. DOI: 10.1063/1.4992333. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4992333>
- [10] Oldrich ZMESKAL, Pavel FLORIAN, Katerina VALENTOVA a Lukas FIALA. Correlation between dielectric and thermal properties of alkali-activated aluminosilicates with carbon fiber admixture. *AIP conference proceedings*. **2018**, 250002, 1–4 DOI: 10.1063/1.5043877. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5043877>
- [11] PECHÁČKOVÁ, Kateřina, Pavel FLORIAN, Zbyšek PAVLÍK a Oldřich ZMEŠKAL. Thermal properties of high performance fiber reinforced concrete. *AIP conference proceedings*. **2018**, 020037, 1–4. DOI: 10.1063/1.5047631. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5047631>

- [12] Keun-Hyeok YANG, Kyung-Ho LEE, Jin-Kyu SONG a Min-Ho GONG. Properties and sustainability of alkali-activated slag foamed concrete. *Journal of Cleaner Production*. **2014**, 68, 226–233. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.12.068. ISSN 09596526. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652613009220>
- [13] Ken MILLS. THE ESTIMATION OF SLAG PROPERTIES. *Southern African Pyrometallurgy 2011 International Conference*. Cradle of Humankind, South Africa, **2011**. Dostupné z: <http://www.pyro.co.za/KenMills/KenMills.pdf>
- [14] Divya KHALE a Rubina CHAUDHARY. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. *Journal of Materials Science* [online]. **2007**, 42(3), 729–746. DOI: 10.1007/s10853-006-0401-4. ISSN 0022–2461. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10853-006-0401-4>
- [15] John L. PROVIS, Angel PALOMO a Caijun SHI. Advances in understanding alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*. **2015**, 78, 110–125. DOI: 10.1016/j.cemconres.2015.04.013. ISSN 00088846. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884615001192>
- [16] Antonia MARTIN, Jose Y. PASTOR, Angel PALOMO a Ana FERNÁNDEZ JIMÉNEZ. Mechanical behaviour at high temperature of alkali-activated aluminosilicates (geopolymers). *Construction and Building Materials*. **2015**, 93, 1188–1196. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.04.044. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061815004870>
- [17] Zhenzi JING, Wenbo HAO, Xiaojun HE, Junjie FAN, Yi ZHANG, Jiajun MIAO a Fangming JIN. A novel hydrothermal method to convert incineration ash into pollucite for the immobilization of a simulant radioactive cesium. *Journal of Hazardous Materials*. **2016**, 306, 220–229. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.12.024. ISSN 03043894. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389415302855>
- [18] M. F. MONTEMOR, A.M.P SIMÕES a M.M. SALTA. Effect of fly ash on concrete reinforcement corrosion studied by EIS. *Cement and Concrete Composites*. **2000**, 22(3), 175–185. DOI: 10.1016/S0958-9465(00)00003-2. ISSN 09589465. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946500000032>
- [19] Rafael Andres ROBAYO-SALAZAR, Jhonathan Fernando RIVERA a Ruby MEJÍA DE GUTIÉRREZ. Alkali-activated building materials made with recycled construction and demolition wastes. *Construction and Building Materials*. **2017**, 149, 130–138. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.122. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061817310073>
- [20] PU-WOEI CHEN. Carbon fiber reinforced concrete for smart structures capable of non-destructive flaw detection. *Smart Materials and Structures*. **1993**, 2(1), 22–30. DOI: 10.1088/0964-1726/2/1/004. ISSN 0964-1726. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0964-1726/2/i=1/a=004?key=crossref.10cb0feb77bff20a62d6dc080bc6bef7>
- [21] Baoguo HAN, Xun YU a Jinping OU. Structures of Self-Sensing Concrete. *Self-Sensing Concrete in Smart Structures*. Elsevier, **2014**, s. 1–12. DOI: 10.1016/B978-0-12-800517-0.00001-0. ISBN 9780128005170. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128005170000010>
- [22] Baoguo HAN, Xun YU a Jinping OU. Compositions of Self-Sensing Concrete. *Self-Sensing Concrete in Smart Structures*. Elsevier, **2014**, s. 13–43. DOI: 10.1016/B978-0-12-800517-0.00002-2. ISBN 9780128005170. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128005170000022>

- [23] Hak Gu LEE, Seong Su KIM a Dai Gil LEE. Effect of compacted wear debris on the tribological behavior of carbon/epoxy composites. *Composite Structures*. **2006**, 74(2), 136–144. DOI: 10.1016/j.compstruct.2005.03.014. ISSN 02638223. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822305000905>
- [24] Yongjia HE, Linu LU, Shun JIN a Shuguang HU. Conductive aggregate prepared using graphite and clay and its use in conductive mortar. *Construction and Building Materials*. **2014**, 53, 131–137. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.085. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061813011185>
- [25] M. A. ALSHAREF, Jamal, Mohd Raihan TAHA a Tanveer AHMED KHAN. PHYSICAL DISPERSION OF NANOCARBONS IN COMPOSITES—A REVIEW. *Jurnal Teknologi*. **2017**, 79(5). DOI: 10.11113/jt.v79.7646. ISSN 2180-3722. Dostupné z: <https://jurnalteknologi.utm.my/index.php/jurnalteknologi/article/view/7646/6147>
- [26] Baoguo HAN, Xun YU a Jinping OU. Nickel-Powder-Based Self-Sensing Concrete. *Self-Sensing Concrete in Smart Structures*. Elsevier, **2014**, s. 271-313. DOI: 10.1016/B978-0-12-800517-0.00009-5. ISBN 9780128005170. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128005170000095>
- [27] Carolyn DRY. Matrix cracking repair and filling using active and passive modes for smart timed release of chemicals from fibers into cement matrices. *Smart Materials and Structures*. **1994**, 3(2), 118–123. DOI: 10.1088/0964-1726/3/2/006. ISSN 0964-1726. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0964-1726/3/i=2/a=006?key=crossref.90933951d0512742e0cdfc8f4da6fe4b>
- [28] Anna Laura PISELLO, Antonella D’ALESSANDRO, Claudia FABIANI, Alessandro Pio FIORELLI, Filippo UBERTINI, Luisa F. CABEZA, Annibale Luigi MATERAZZI a Franco COTANA. Multifunctional Analysis of Innovative PCM-filled Concretes. *Energy Procedia*. **2017**, 111, 81–90. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.010. ISSN 18766102. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610217300279>
- [29] Impedance Measurement Handbook. *Keysight Technologies*. **2016**, [cit. 2017-01-23]. Dostupné z: <<http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5950-3000.pdf>>
- [30] G.V.P. BHAGATH SINGH a Kolluru V.L. SUBRAMANIAM. Quantitative XRD study of amorphous phase in alkali activated low calcium siliceous fly ash. *Construction and Building Materials*. **2016**, 124, 139–147. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.081. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061816311813>
- [31] Yanshan YIN, Jie YIN, Wei ZHANG, et al. FT-IR and micro-Raman spectroscopic characterization of minerals in high-calcium coal ashes. *Journal of the Energy Institute*. **2017**. DOI: 10.1016/j.joei.2017.02.003. ISSN 17439671. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1743967116306742>
- [32] Tao YANG, Xiao YAO a Zuhua ZHANG. Quantification of chloride diffusion in fly ash-slag-based geopolymers by X-ray fluorescence (XRF). *Construction and Building Materials*. **2014**, 69, 109–115. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.031. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061814007557>
- [33] Produkt – Struska. *Kotouč Štramberk, spol. s r.o.* [cit. 2017-10-18]. Dostupné z: [http://www.kotouc.cz/produkt\\_struska.php](http://www.kotouc.cz/produkt_struska.php)



- [34] Vodní sklo sodné tekuté (MP 1,6 - 2,6). *Vodní sklo a. s.* [cit. 2017-10-18]. Dostupné z:  
[http://www.vodnisklo.cz/data/pdf/bezpecnostni\\_listy/nove\\_bl/BL\\_Vodni\\_sklo\\_sodn\\_e\\_tekute\\_MP\\_16\\_-\\_26.pdf](http://www.vodnisklo.cz/data/pdf/bezpecnostni_listy/nove_bl/BL_Vodni_sklo_sodn_e_tekute_MP_16_-_26.pdf)
- [35] TRITON X-100 (Laboratory Grade). *Sigma Aldrich*®. [cit. 2017-09-26]. Dostupné z:  
<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sial/x100?lang=en&region=CZ>
- [36] Lukas FIALA, Milos JERMAN, Pavel ROVNANIK a Robert CERNY. Basic physical, mechanical and electrical properties of electrically enhanced alkali-activated aluminosilicates. *Materials and Technology*. 2017, 51(5), 87–91. DOI: 10.17222/mit.2017.051. Dostupné z: <http://mit.imt.si/Revija/izvodi/mit176/fiala.pdf>
- [37] *Graphistrength*® CW2-45. [cit. 2018-16-02]. Dostupné z:  
<https://www.graphistrength.com/export/sites/graphistrength/.content/medias/downloads/literature/Graphistrength-C-W2-45-English-Dec2013.pdf>
- [38] Carbon Conductive Paint. *Spi Supplies*®. [cit. 2017-10-20]. Dostupné z:  
<http://www.2spi.com/item/z05006/carbon-paints-pastes/>
- [39] Silver Conductive Paint. *Spi Supplies*®. [cit. 2017-10-20]. Dostupné z:  
<http://www.2spi.com/item/z05001/silver-paints-pastes/>
- [40] Maria MIKOVA. *Silikátové materiály se zvýšenou elektrickou vodivostí*. Brno, 2016. 50 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav chemie. Vedoucí práce doc. RNDr. Pavel Rovnaník, Ph.D. Dostupné z:  
[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor verejne.php?file\\_id=134369](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor verejne.php?file_id=134369)
- [41] Ivo KUSAK, Miroslav LUNAK a Pavel. ROVNANIK. Impact of graphite admixture on electrical properties of alkali-activated slag mortars. *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences, 2017, 107. DOI: 10.1051/mateconf/201710700035. ISSN 2261236X. Dostupné z: [https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/21/mateconf\\_dyn2017\\_00035.pdf](https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/21/mateconf_dyn2017_00035.pdf)
- [42] Pavel ROVNANIK, Hana SIMONOVA, Libor TOPOLAR a Zbynek KERSNER. Mechanical Fracture Properties of Alkali-Activated Slag with Graphite Filler. *Procedia Engineering*. 2017, 190, 43–48. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.305. ISSN 18777058. Dostupné z:  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705817324451>
- [43] LUNAK, Miroslav, Ivo KUSAK a Zdenek CHOBOLA. Carbon Admixtures Influence on the Electrical Properties of Slag Mortars Focusing on Alternating Conductivity and Permittivity. *Procedia Engineering*. 2016, 151, 236–240. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.359. ISSN 18777058. Dostupné z:  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705816317477>
- [44] Pavel ROVNANIK, Maria MIKOVA a Ivo KUSAK. Electrical Properties of Alkali-Activated Slag Mortar with Carbon Fibres. *Materials Science Forum*. 2017, 908, 100–105. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.908.100. ISSN 1662-9752. Dostupné z: <http://www.scientific.net/MSF.908.100>
- [45] Lukas FIALA, Pavel ROVNANIK a Robert. CERNY. Experimental analysis of electrical properties of composite materials. *AIP Conference Proceedings*. 020016, 1–6. DOI: 10.1063/1.4975431. Dostupné z:  
<http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4975431>

- [46] Pavel ROVNANIK, Hana SIMONOVA, Libor TOPOLÁR, Patrik BAYER, Pavel SCHMID a Zbyněk KERSNER. Carbon nanotube reinforced alkali-activated slag mortars. *Construction and Building Materials*. **2016**, 119, 223–229. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.051. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061816307759>
- [47] 6517B Electrometer/High Resistance Meter Datasheet. **2016**, [cit. 19. 1. 2017]. Dostupné z: <[http://www.tek.com/sites/tek.com/files/media/media/resources/6517B-Datasheet\\_1KW-60280-1.pdf](http://www.tek.com/sites/tek.com/files/media/media/resources/6517B-Datasheet_1KW-60280-1.pdf)>
- [48] Keithley 2400 SourceMeter® SMU Instruments | Tektronix. **2017**, [cit. 19. 1. 2017]. Dostupné z: <[http://download.tek.com/datasheet/Series\\_2400\\_DS\\_041216.pdf](http://download.tek.com/datasheet/Series_2400_DS_041216.pdf)>
- [49] 1260A Impedance/gain-phase Analyzer. **2017**, [cit. 12. 10. 2017]. Dostupné z: <[http://www.ameteksi.com/-/media/ameteksi/download\\_links/documentations/1260a/1260a\\_a4.pdf](http://www.ameteksi.com/-/media/ameteksi/download_links/documentations/1260a/1260a_a4.pdf)>
- [50] 1296A | Dielectric Interface | Solartron Analytical. **2017**, [cit. 19. 1. 2017]. Dostupné z: <[http://www.ameteksi.com/-/media/ameteksi/download\\_links/documentations/1296/1296a\\_brochure\\_a4\\_reva.pdf](http://www.ameteksi.com/-/media/ameteksi/download_links/documentations/1296/1296a_brochure_a4_reva.pdf)>
- [51] 6622A System Power Supply, 80W, 2 outputs [Discontinued] | Keysight (formerly Agilent's Electronic Measurement). [cit. 12. 4. 2018]. Dostupné z: <https://www.keysight.com/en/pd-836779-pn-6622A/system-power-supply-80w-2-outputs?cc=CZ&lc=eng>
- [52] 34420A Micro-Ohm Meter | Keysight (formerly Agilent's Electronic Measurement). 12. dubna 2018. Dostupné z: <https://www.keysight.com/en/pd-1000001296%3Aepsg%3Apro-pn-34420A/micro-ohm-meter?cc=CZ&lc=eng>
- [53] Nikon | Microscope Solutions | ECLIPSE E200 - Key Features. 12. dubna 2018. Dostupné z: [https://www.nikon.com/products/microscope-solutions/lineup/upright\\_clinical/e200/](https://www.nikon.com/products/microscope-solutions/lineup/upright_clinical/e200/)
- [54] D5000 2012 Digitální fotoaparáty Výrobky, jejichž výroba byla ukončena. 12. dubna 2018. Dostupné z: [https://www.nikon.cz/cs\\_CZ/product/discontinued/digital-cameras/2012/d5000](https://www.nikon.cz/cs_CZ/product/discontinued/digital-cameras/2012/d5000)
- [55] Chenhui LIU, Libo ZHANG, Jinhui PENG, Chandrasekar SRINIVASAKANNAN, Bingguo LIU, Hongying XIA, Junwen ZHOU a Lei XU. Temperature and Moisture Dependence of the Dielectric Properties of Silica Sand. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*. **2016**, 47(3), 199–209. DOI: 10.1080/08327823.2013.11689858. ISSN 0832-7823. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/08327823.2013.11689858>
- [56] M. CABEZA, P. MERINO, A. MIRANDA, X.R. NÓVOA a I. SANCHEZ. Impedance spectroscopy study of hardened Portland cement paste. *Cement and Concrete Research*. **2002**, 32(6), 881–891. DOI: 10.1016/S0008-8846(02)00720-2. ISSN 00088846. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884602007202>

## 7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

### Zkratky

AAA	alkali-activated aluminosilicates – alkalicky aktivované aluminosilikáty
AAC	alkali-activated concretes – alkalicky aktivované betony
AF	aluminosilikátová fáze
CB	carbon black – uhlíkové saze
CF	carbon fibers – uhlíková vlákna
CNF	carbon nanofibers – uhlíková nanovlákna
CNT	carbon nanotubes – uhlíkové nanotrubičky
CPE	constant phase element – člen konstantního fázového posunu
CVD	chemical vapor deposition – chemické nanášení z plynné fáze
ECC	electrically conductive concrete – elektricky vodivý beton
EIS	elektrochemická impedanční spektroskopie
FT-IR	fourier transform infrared spectroscopy – Infračervená spektroskopie s fourierovou transformací
$G, G_p, G_s$	konduktance obecná, paralelní a sériová (conductance general, parallel and serial)
GP	graphite powder – grafitový prášek
hm. %	procentuální hmotnostní koncentrace
IS	impedanční spektroskopie
MAS-NMR	magic-angle spinning nuclear magnetic resonance – nukleární magnetická rezonance pod magickým úhlem
MIP	mercury intrusion porosimetry – rtuťová porozimetrie
NP	nickel powder – niklový prášek
PAN	polyakrylonitril
PC	portlandský cement
PMMA	polymethylmethacrylate – polymetylmetakrylát
SEM	skenovací elektronová mikroskopie
SF	steel fibers – ocelová vlákna
SS	steel slag – ocelářenská struska
TEM	transmisní elektronová mikroskopie
V-A	volt-ampérová
$X, X_p, X_s$	reaktance obecná, paralelní a sériová (reactance general, parallel and serial)
XRD	X-ray diffraction spectroscopy – rentgenová difrakční spektroskopie
XRF	X-ray fluorescence spectroscopy – rentgenová fluorescenční spektroskopie

## Symbols

$a$	teplotní vodivost (thermal diffusivity)
$a_{\text{ox}}$ a $a_{\text{red}}$	aktivity oxidované a redukované formy látky
$A$	koeficient tepelné absorpce
$A_k$	předexponenciální faktor pro výpočet měrné elektrické vodivosti
$A_W$	předexponenciální faktor pro výpočet viskozity
$B_k$	aktivační energie dělená univerzální plynovou konstantou ( $E_A/R_m$ )
$B, B_p, B_s$	susceptance obecná, paralelní a sériová
$c$	měrná tepelná kapacita – specific heat capacity
$c_M$	molární koncentrace
$c_p$	měrná tepelná kapacita měřená za konstantního tlaku
$c_v$	měrná tepelná kapacita měřená za konstantního objemu
$C$	kondenzátor (kapacitor)
$C$	elektrická kapacita kondenzátoru (capacitance, capacitance)
$C_p$	paralelní kondenzátor
$CPE$	člen konstantního fázového posunu
$C_p$	paralelní elektrická kapacita – capacitance (parallel capacitance)
$D$	dimenze zdroje tepla
$D_Z$	ztrátový faktor
$E$	dimenze prostoru, ve kterém se šíří teplo
$E_{AP}$	molární aktivační energie povrchového napětí
$E_{AV}$	molární aktivační energie viskozity
$E_0$	standardní elektrodový potenciál redoxního páru
$f$	frekvence (frequency)
$F$	Faradayova konstanta
$h$	vzdálenost teplotního senzoru od tepelného zdroje (šířka vzorku)
$i$	imaginární jednotka
$I$	velikost elektrického proudu
$L$	cívka (induktor)
$L$	elektrická indukčnost cívky
$m$	hmotnost materiálu
$NBO/T$	poměr koncentrací nepřemost'ujících a tetragonálně vázaných atomů kyslíku
$n$	CPE parametr (parameter of constant phase element)
$P$	výkon tepelného zdroje
$P_s$	stupeň zesíťování aluminosilikátu
$P_D$	stupeň polymerizace aluminosilikátu
$q$	plošná hustota tepelného toku
$Q$	množství tepla dodané tepelným zdrojem (J)
$R$	rezistor
$R$	elektrický odpor nebo rezistance (resistance)
$R_m$	univerzální plynová konstanta
$R_p$	paralelní rezistor
$R_p$	paralelní elektrický odpor nebo rezistance
$R_s$	sériový rezistor
$R_s$	sériový elektrický odpor nebo rezistance
$R_Z$	parametr tepelných ztrát

$S$	plocha, kterou prochází tepelný tok
$sd$	rozměr čtvercové podstavy vzorku
$t$	čas (time)
$t_D$	difuzní čas
$t_R$	relaxační čas
$T$	termodynamická teplota
$T_g$	teplota skelného přechodu
$T_{liq}$	teplota tání
$T_{sol}$	teplota tuhnutí
$U$	elektrické napětí
$w/c$	poměr hmotnosti vody a cementu nebo jiného pojiva (water/cement ratio)
$x$	molární zlomek
$Y$	admittance
$Y_0$	admittance při jednotkové frekvenci
$ Y $	velikost admittance
$z_i$	elektrický náboj iontu
$Z$	impedance
$ Z $	velikost impedance (impedance magnitude)
$Z_C$	impedance kondenzátoru
$Z_{el}$	počet přenášených elektronů v elektrochemické reakci
$Z_G$	Gerisherova impedance
$Z_L$	impedance cívky
$Z_O$	impedance tangenciálního členu
$Z_Q$	impedance členu konstantního fázového posunu
$Z_W$	Warburgova impedance
$\alpha$	hodnota charakterizující vlastnosti tepelného zdroje
$\alpha_0$	hodnota definující typ ohřevu
$\gamma_M$	povrchové napětí kovu
$\gamma_S$	povrchové napětí aluminosilikátu
$\gamma_{SM}$	povrchové napětí rozhraní aluminosilikát-kov
$\Delta G_{XS}$	změna přebytku volné energie
$\Delta S_{FUS}$	změna slučovací entropie
$\Delta T$	teplotní rozdíl vztažený k teplotě zdroje (temperature difference)
$\Delta T_0$	teplotní odezva ve stacionárním stavu
$\Delta\rho/\rho$	relativní změna měrného elektrického odporu
$\eta$	viskozita
$\lambda$	měrná tepelná vodivost (specific heat conductivity)
$\mu$	mobilita nosičů nábojů
$\rho$	měrný elektrický odpor, rezistivita
$\rho_m$	hustota materiálu
$\rho_V$	objemová hmotnost (zdánlivá hustota) vzorku
$\sigma$	měrná elektrická vodivost
$\Phi$	interakční koeficient
$\varphi$	fázový posun mezi napětím a proudem nebo fázový posun mezi tepelným výkonem a $\Delta T$ (phase shift)
$\omega$	úhlová frekvence střídavého proudu

## 8 SEZNAM PUBLIKACÍ A AKTIVIT V PRŮBĚHU DOKTORSKÉHO STUDIA

### Konferenční příspěvky

Pavel FLORIAN, Oldrich ZMESKAL, Jan POSPIŠIL. *Simple method for determination of type charge carriers in semiconductors*. Chemistry & Life 2015 – Book of abstracts. first. Purkynova 464/118, CZ- 612 00 Brno: Brno University of Technology, Faculty of Chemistry, **2015**. 133-134. ISBN: 978-80-214-5228- 2.

Lucie TRHLIKOVA, Oldrich ZMESKAL, Petr PSENCIK, Pavel FLORIAN. Study of the thermal properties of filaments for 3D printing. *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing, **2016**, 1752(1). DOI: 10.1063/1.4955258. ISBN 978-0-7354-1410-5. ISSN 0094-243X.

Pavel FLORIAN, Katerina VALENTOVA, Lukas FIALA, Oldrich ZMESKAL. Thermal properties of alkali-activated aluminosilicates. *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing, **2017**, 1866(1). DOI: 10.1063/1.4994492. ISBN 978-0-7354-1546-1. ISSN 0094-243X.

Oldrich ZMESKAL, Lucie TRHLIKOVA, Lukas FIALA, Pavel FLORIAN, Robert CERNY. Thermal properties of alkali-activated aluminosilicates with CNT admixture. *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing, **2017**, 1863(1). DOI: 10.1063/1.4992333. ISBN 978-0-7354-1538-6. ISSN 0094-243X.

Oldrich ZMESKAL, Pavel FLORIAN, Katerina VALENTOVA, Lukas FIALA. Correlation between dielectric and thermal properties of alkali-activated aluminosilicates with carbon fiber admixture. *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing, **2018**, 1978. DOI: 10.1063/1.5043877. ISBN 978-0-7354-1690-1. ISSN 0094-243X.

Katerina PECHACKOVA, Pavel FLORIAN, Zbysek PAVLIK, Oldrich ZMESKAL. Thermal properties of high performance fiber reinforced concrete. *AIP Conference Proceedings*, **2018**, 1988, 020037. DOI: 10.1063/1.5047631. ISBN: 978-0-7354-1704-5. ISSN 0094-243X.

### Články v indexovaných časopisech

Lucie TRHLIKOVA, Oldrich ZMESKAL, Radek PRIKRYL, Pavel FLORIAN. Thermal Properties of Mannitol Derivative. *Advanced Materials Research*. Zurich: Trans Tech Publications, **2015**, 1126, 181-186. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1126.181. ISSN 10226680.

Pavel FLORIAN, Jan POSPISIL, Oldrich ZMESKAL. Simple Method for the Determination of the Type of Charge Carriers in Semiconductors. *Materials Science Forum*. Pfaffikon: Trans Tech Publications, **2016**, 851, 179-182. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.851.179. ISSN 02555476.

### Konference v průběhu doktorského studia

- 2015 – Chemistry and Life 2015, Brno, Česká republika,  
Thermophysics 2015, Terchová, Slovensko
- 2016 – Thermophysics 2016, Terchová, Slovensko
- 2017 – Thermophysics 2017, Terchová, Slovensko



## 9 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1a: Dielektrické vlastnosti první série vzorků s uhlíkovými sazemi – podélný směr

Příloha 1b: Dielektrické vlastnosti první série vzorků s uhlíkovými sazemi – příčný směr

Příloha 2a: Dielektrické vlastnosti druhé série vzorků s uhlíkovými sazemi – podélný směr

Příloha 2b: Dielektrické vlastnosti druhé série vzorků s uhlíkovými sazemi – příčný směr

Příloha 3a: Dielektrické vlastnosti první série vzorků s grafitovým práškem – podélný směr

Příloha 3b: Dielektrické vlastnosti první série vzorků s grafitovým práškem – příčný směr

Příloha 4a: Dielektrické vlastnosti druhé série vzorků s grafitovým práškem – podélný směr

Příloha 4b: Dielektrické vlastnosti druhé série vzorků s grafitovým práškem – příčný směr

Příloha 5a: Dielektrické vlastnosti první série vzorků s uhlíkovými vlákny – podélný směr

Příloha 5b: Dielektrické vlastnosti první série vzorků s uhlíkovými vlákny – příčný směr

Příloha 6a: Dielektrické vlastnosti druhé série a části první série vzorků s uhlíkovými vlákny – podélný směr

Příloha 6b: Dielektrické vlastnosti druhé série a části první série vzorků s uhlíkovými vlákny – příčný směr

Příloha 7a: Dielektrické vlastnosti vzorků s uhlíkovými nanotrubičkami – podélný směr

Příloha 7b: Dielektrické vlastnosti vzorků s uhlíkovými nanotrubičkami – příčný směr

Příloha 8a: Měrné elektrické vodivosti (konduktivity) vzorků s uhlíkovými sazemi

Příloha 8b: Permittivity vzorků s uhlíkovými sazemi

Příloha 8c: CPE parametry  $n$  vzorků s uhlíkovými sazemi

Příloha 9a: Měrné elektrické vodivosti (konduktivity) vzorků s grafitovým práškem

Příloha 9b: Permittivity vzorků s grafitovým práškem

Příloha 9c: CPE parametry  $n$  vzorků s grafitovým práškem

Příloha 10a: Měrné elektrické vodivosti (konduktivity) vzorků s uhlíkovými vlákny

Příloha 10b: Permittivity vzorků s uhlíkovými vlákny

Příloha 10c: CPE parametry  $n$  vzorků s uhlíkovými vlákny

Příloha 11: Měrné elektrické vodivosti (konduktivity), Permittivity a CPE parametry  $n$  vzorků s uhlíkovými nanotrubičkami

Příloha 12: Tepelné vlastnosti první série vzorků s uhlíkovými sazemi a vzorku PMMA

Příloha 13: Tepelné vlastnosti druhé série vzorků s uhlíkovými sazemi

Příloha 14: Tepelné vlastnosti první série vzorků s grafitovým práškem

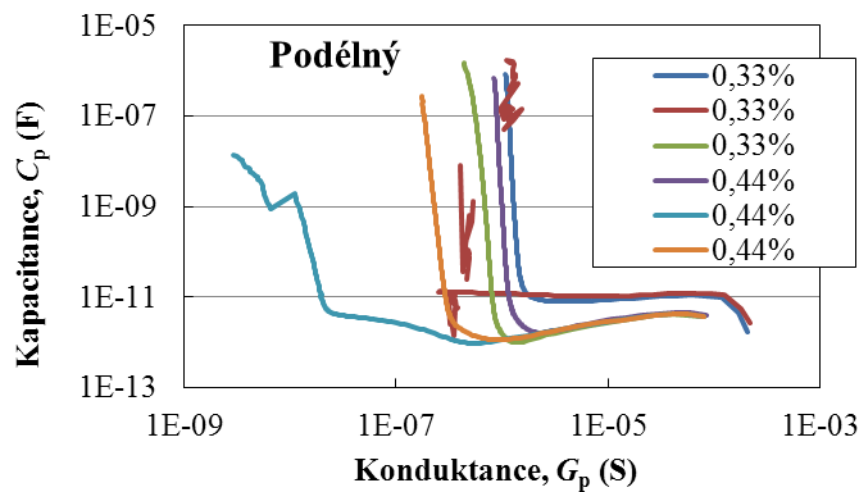
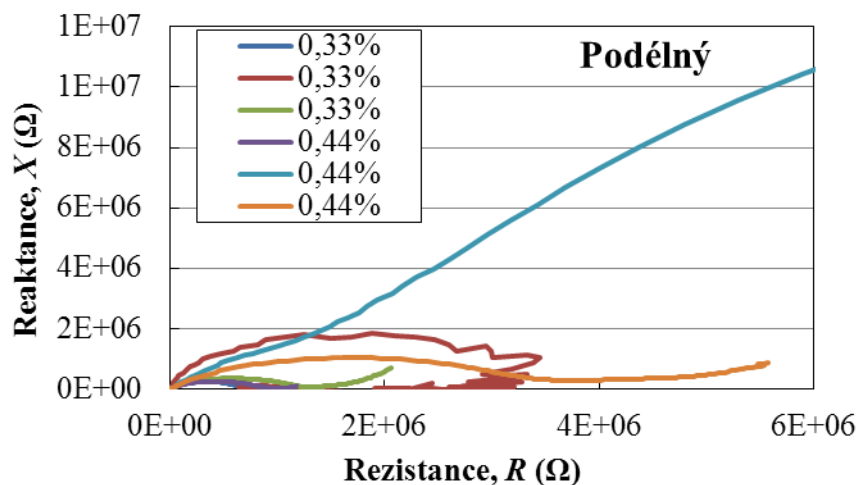
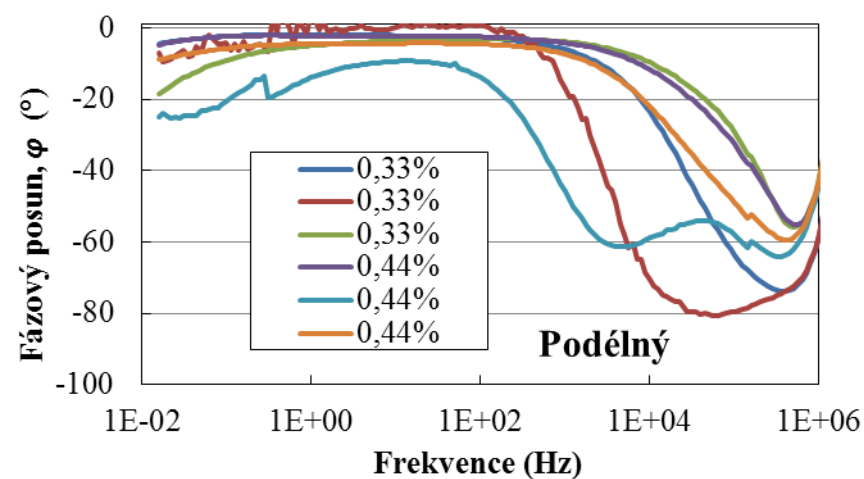
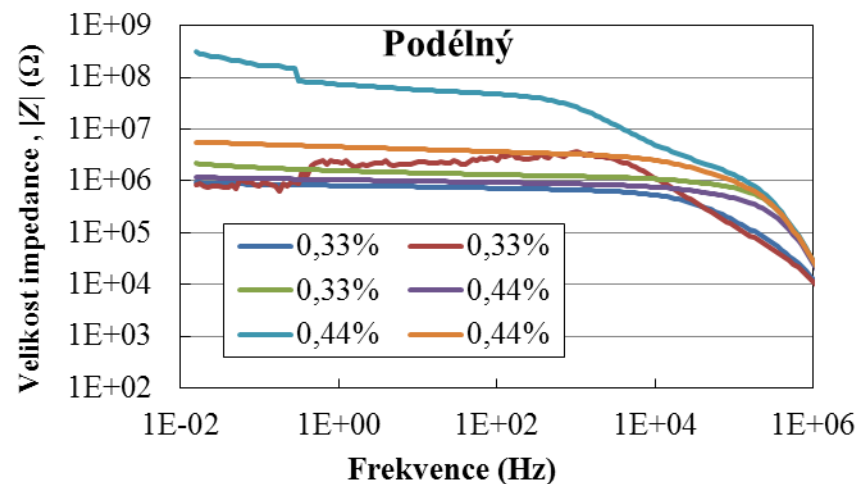
Příloha 15: Tepelné vlastnosti druhé série vzorků s grafitovým práškem

Příloha 16: Tepelné vlastnosti druhé série a části první série vzorků s uhlíkovými vlákny

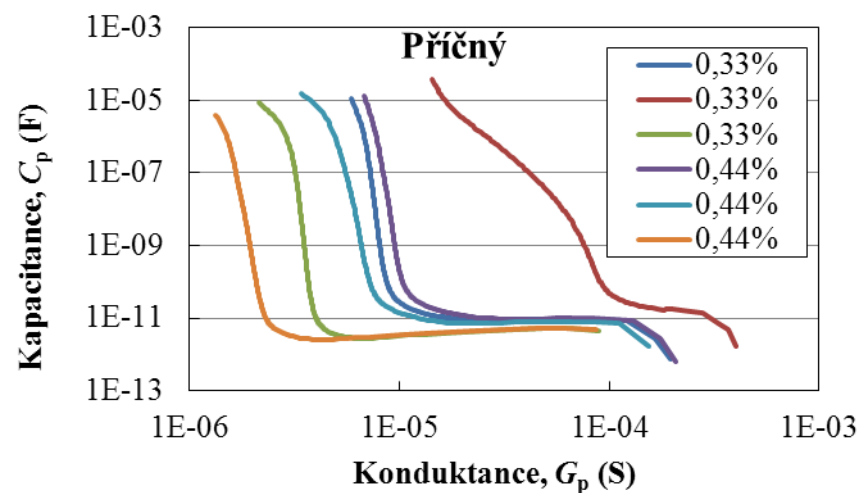
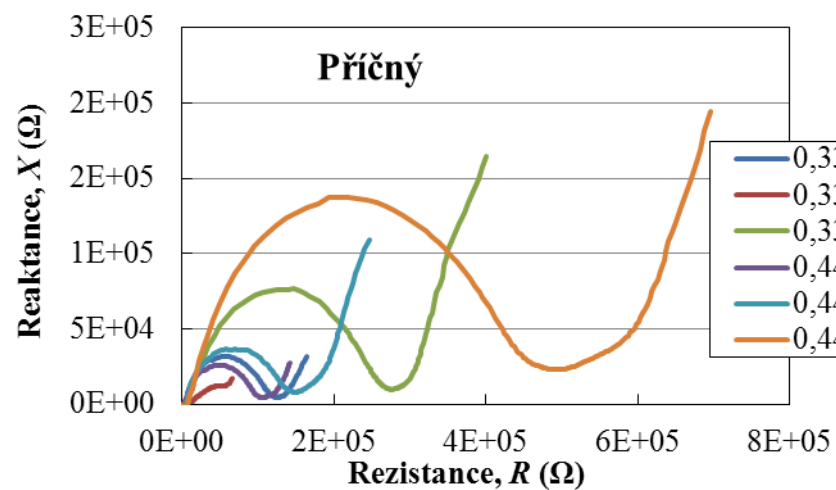
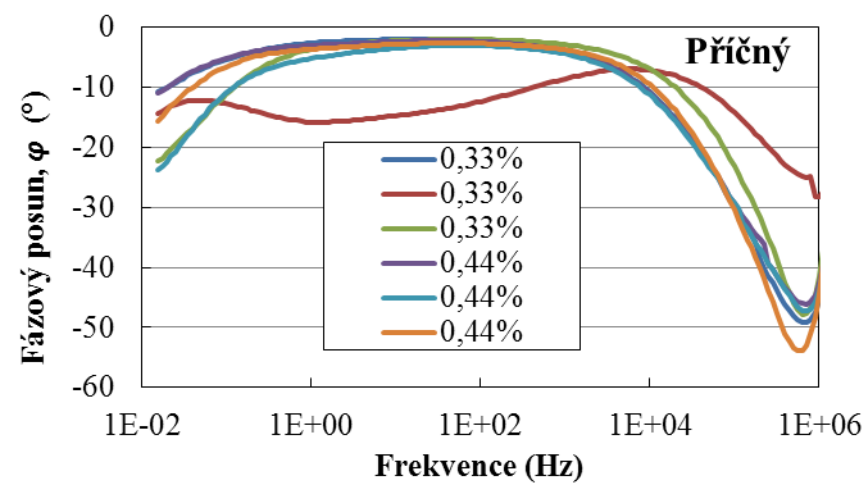
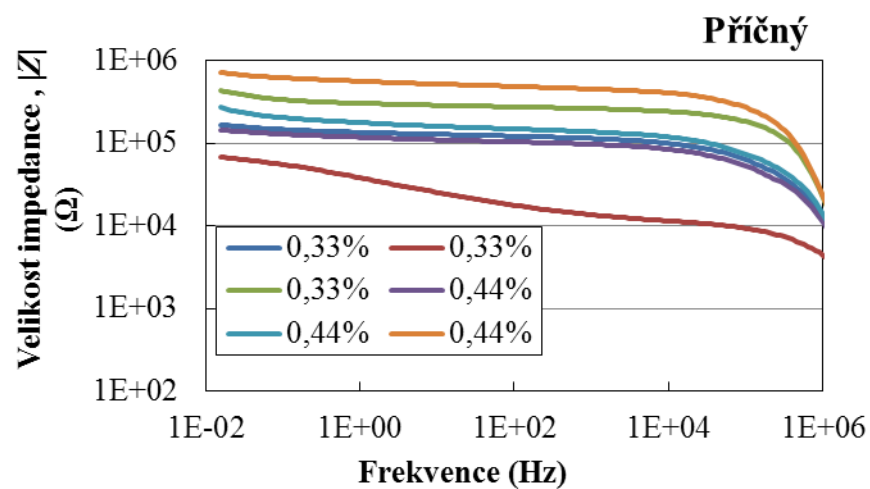
Příloha 17: Tepelné vlastnosti vzorků s uhlíkovými nanotrubičkami

## 10 PŘÍLOHY

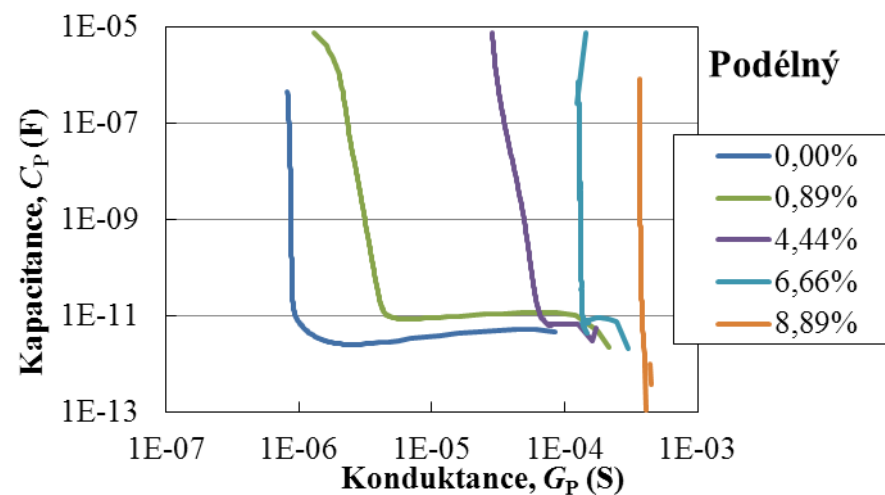
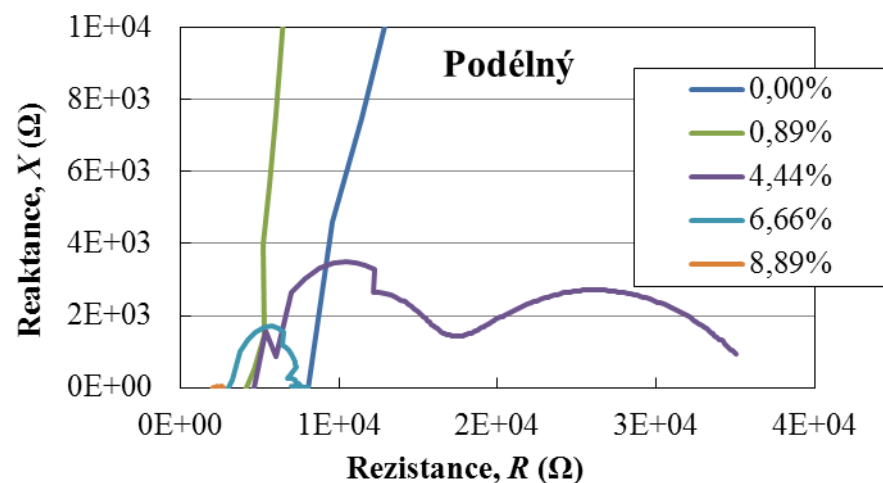
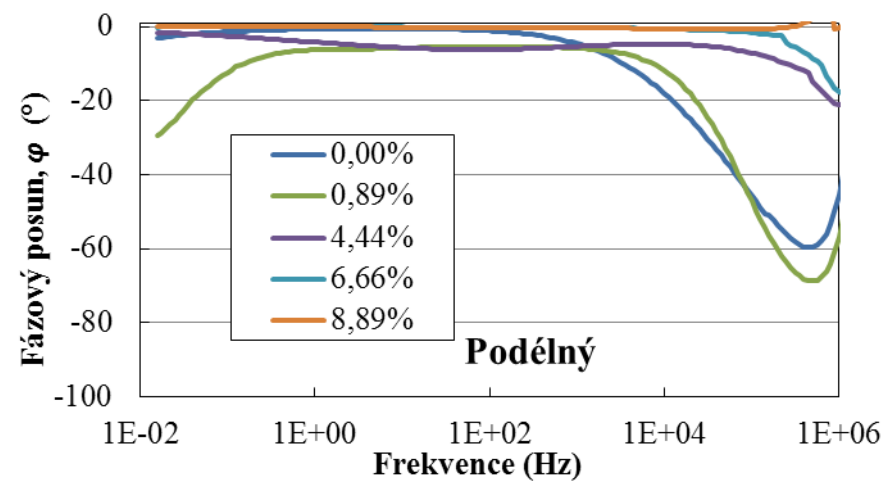
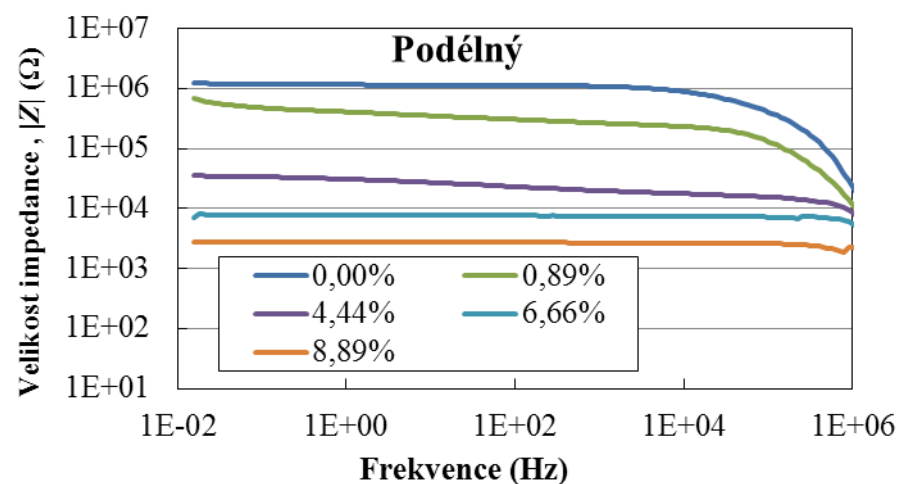
Příloha 1a: Dielektrické vlastnosti první série vzorků s uhlíkovými sazemí – podélný směr



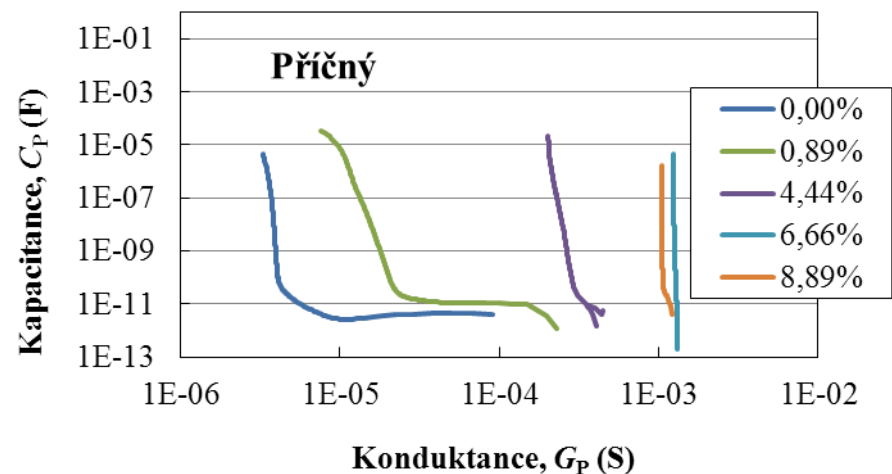
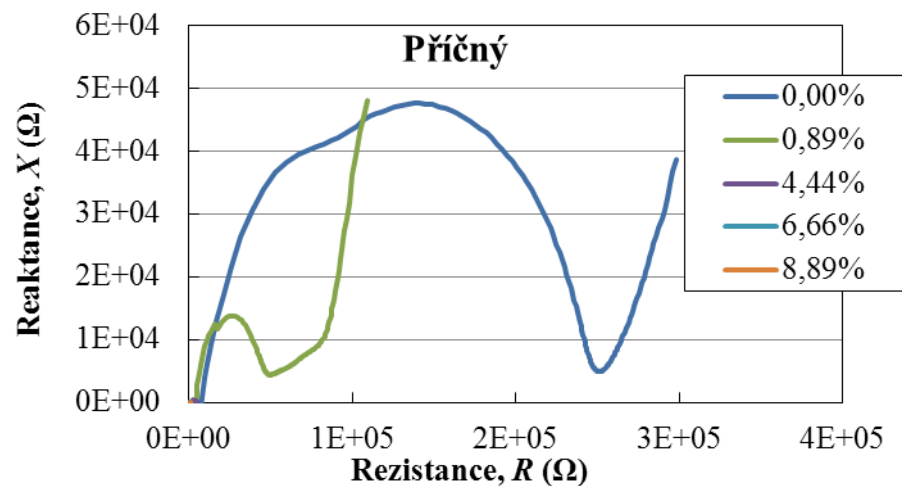
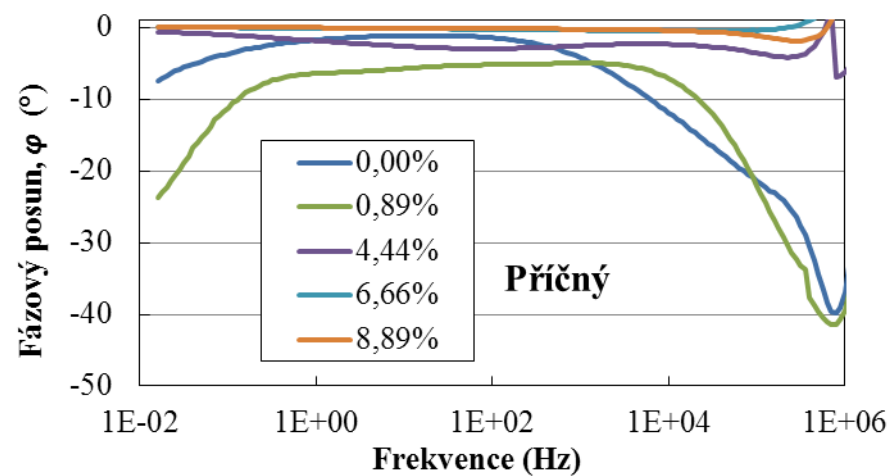
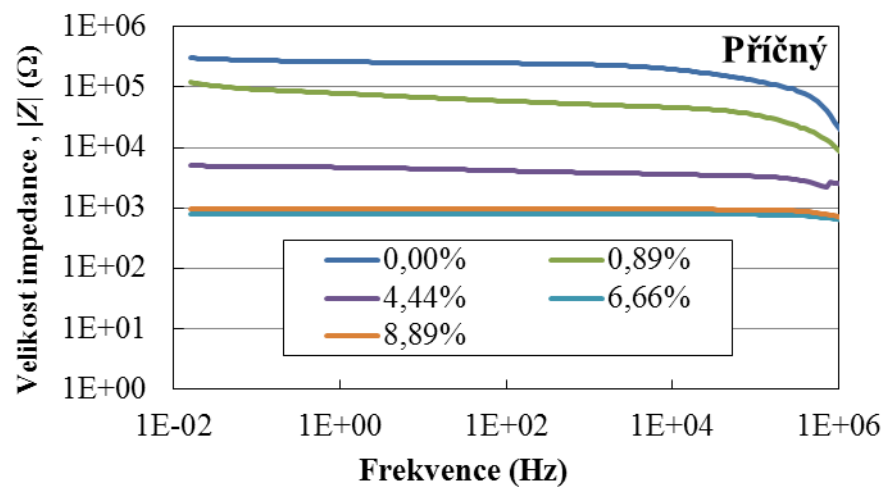
Příloha 1b: Dielektrické vlastnosti první série vzorků s uhlíkovými sazemi – příčný směr



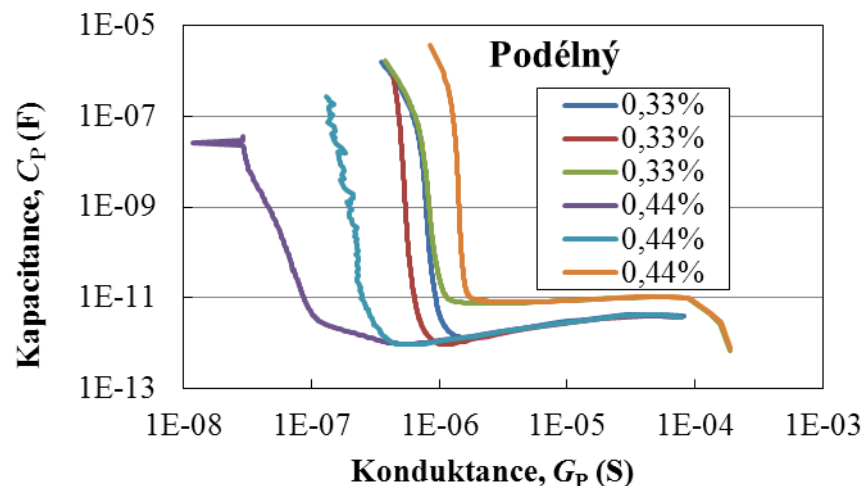
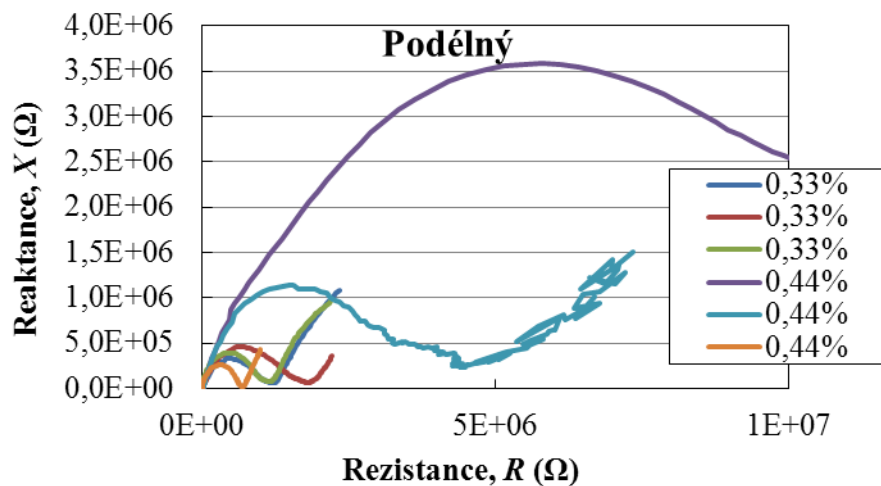
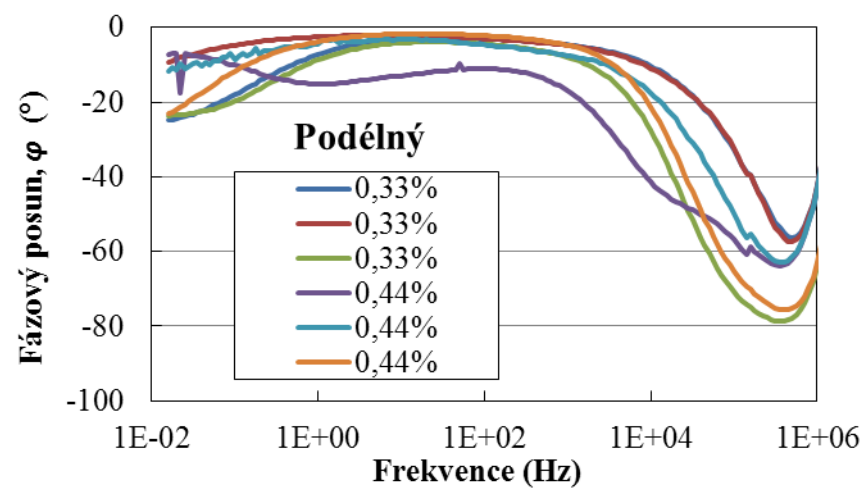
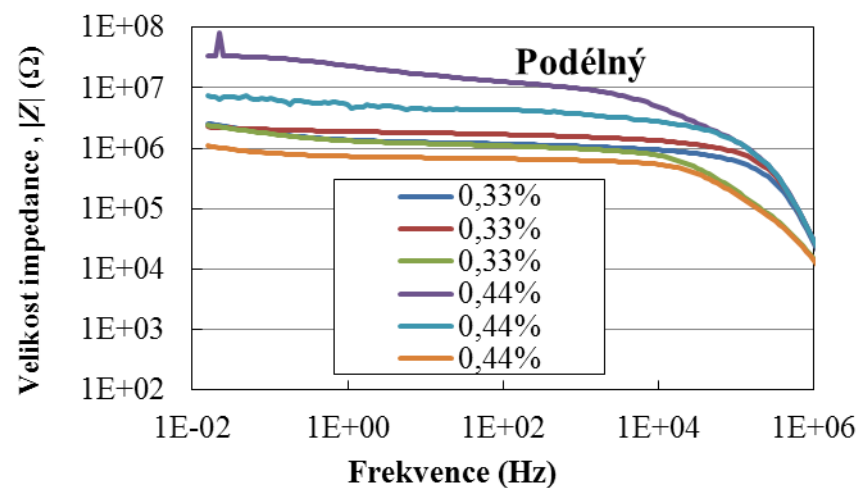
**Příloha 2a: Dielektrické vlastnosti druhé série vzorků s uhlíkovými sazemí – podélný směr**



**Příloha 2b: Dielektrické vlastnosti druhé série vzorků s uhlíkovými sazemí – příčný směr**

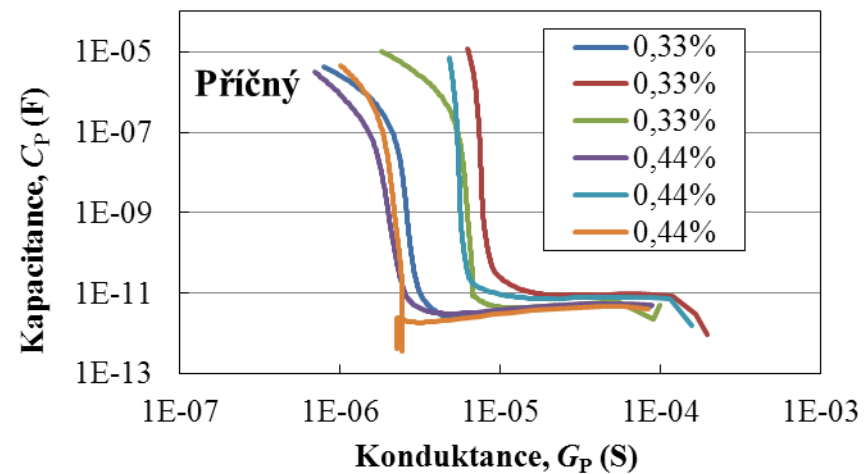
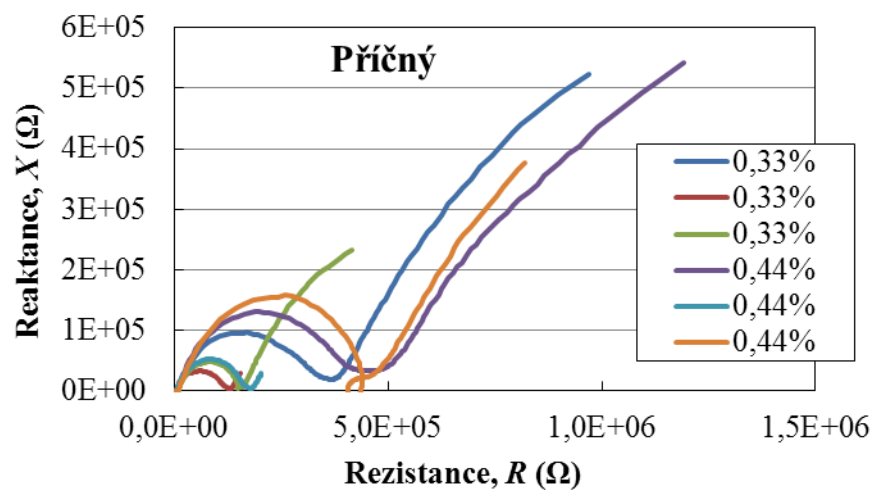
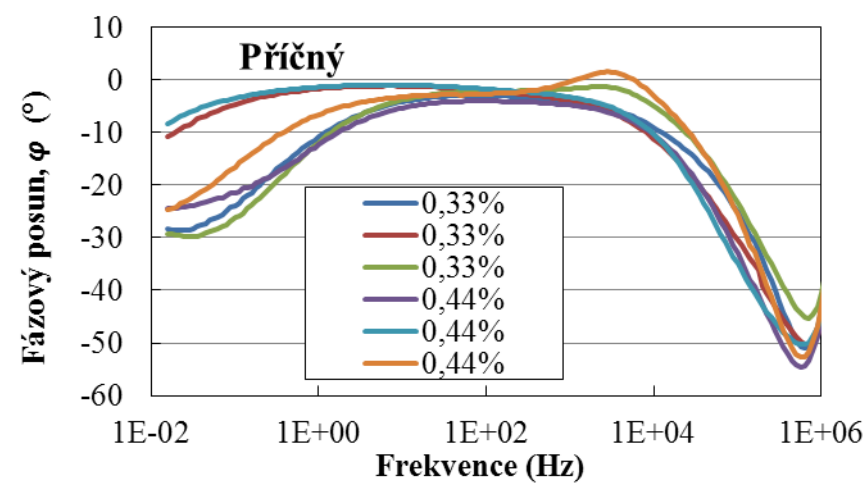
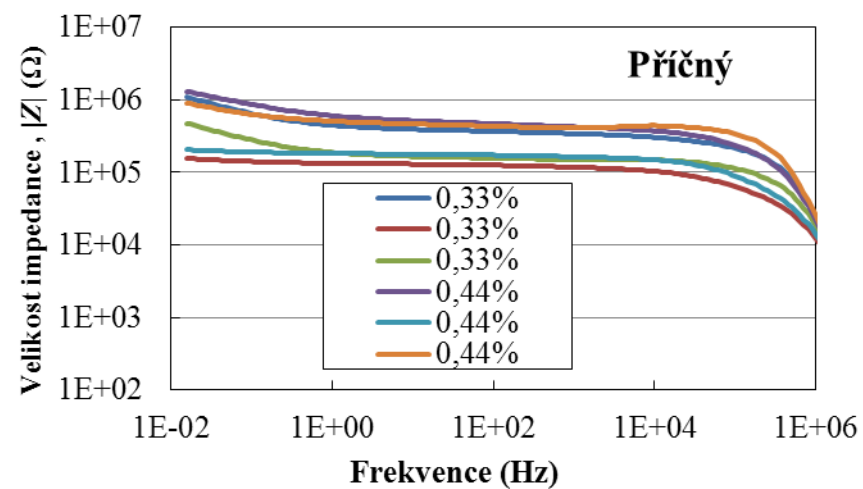


Příloha 3a: Dielektrické vlastnosti první série vzorků s grafitovým práškem – podélný směr

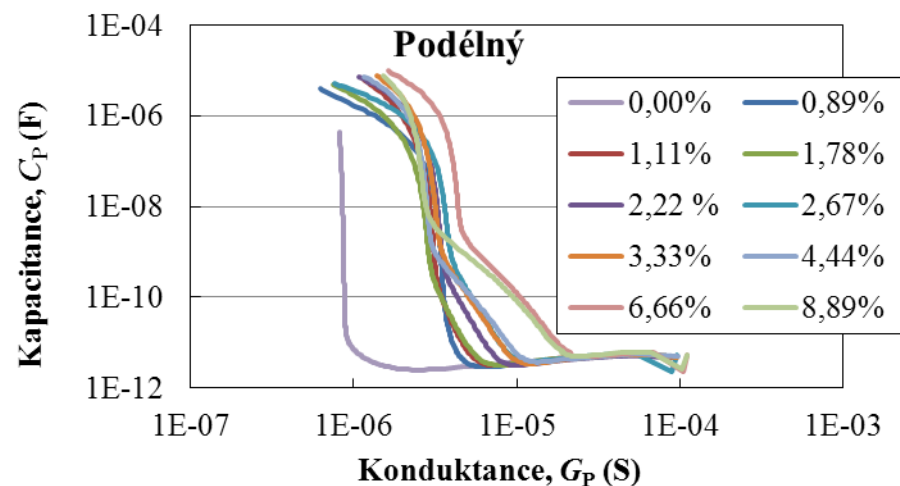
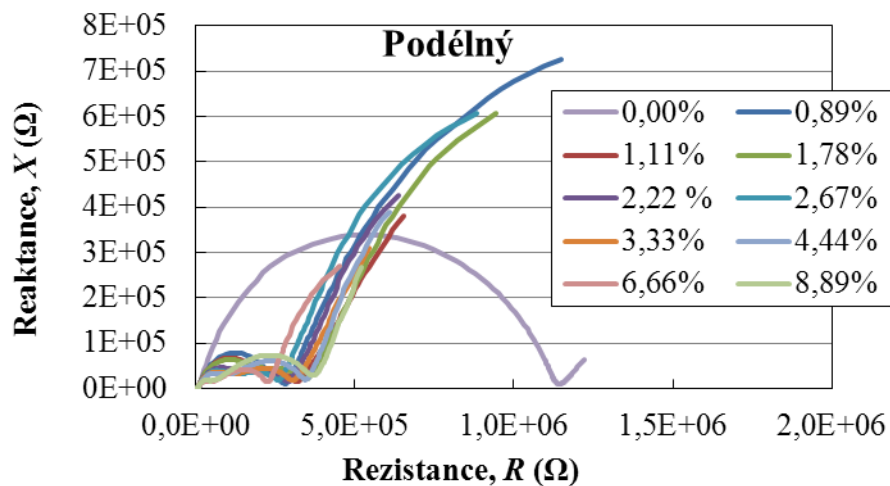
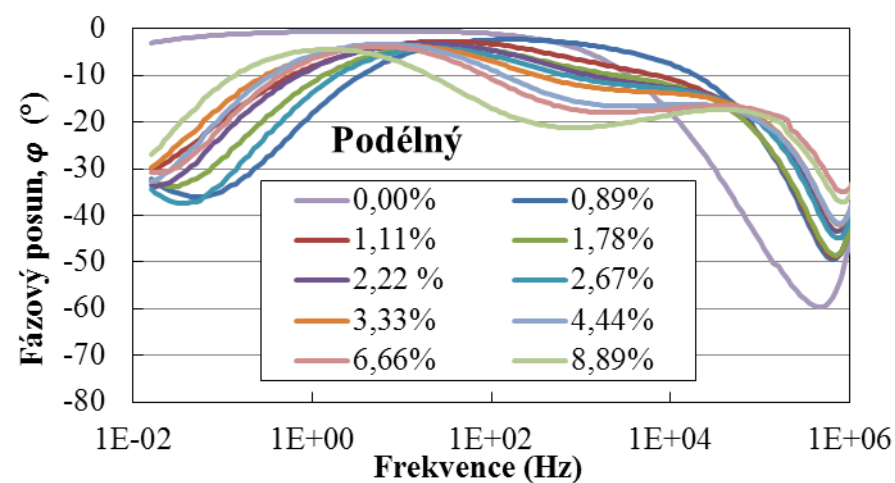
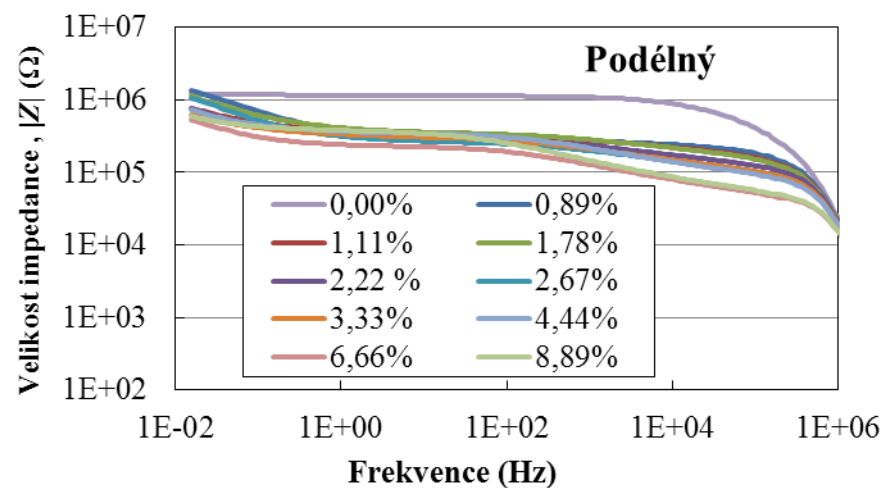




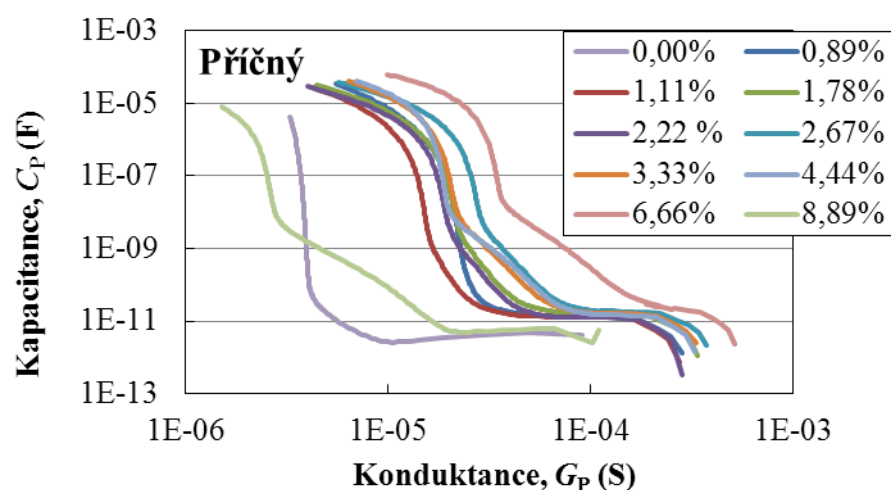
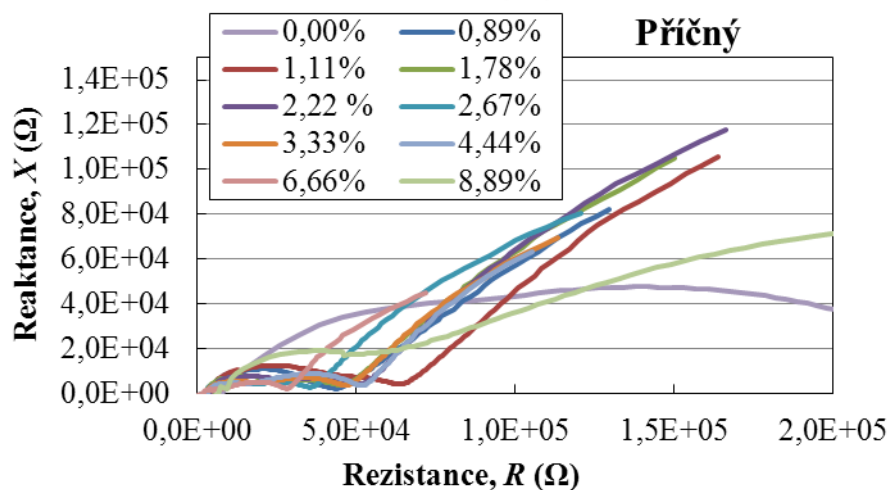
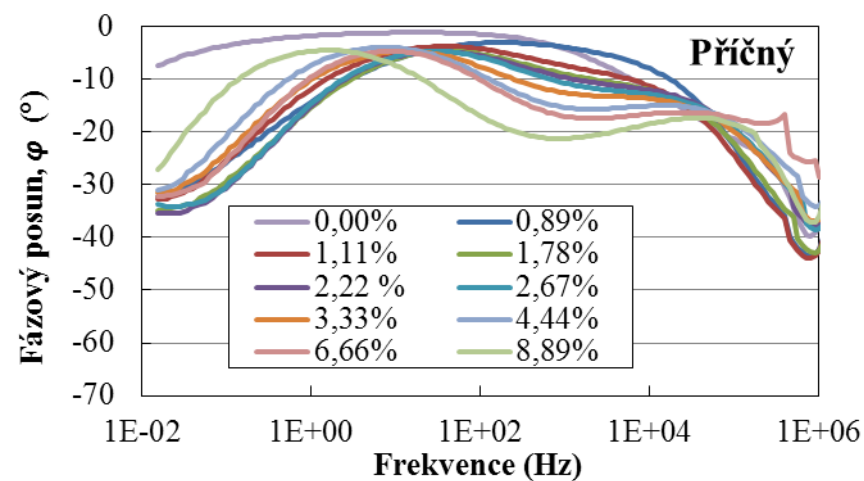
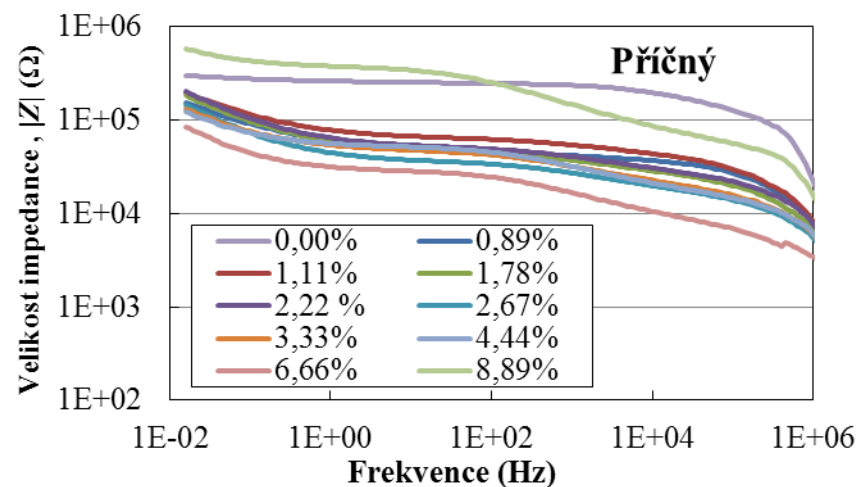
Příloha 3b: Dielektrické vlastnosti první série vzorků s grafitovým práškem – příčný směr



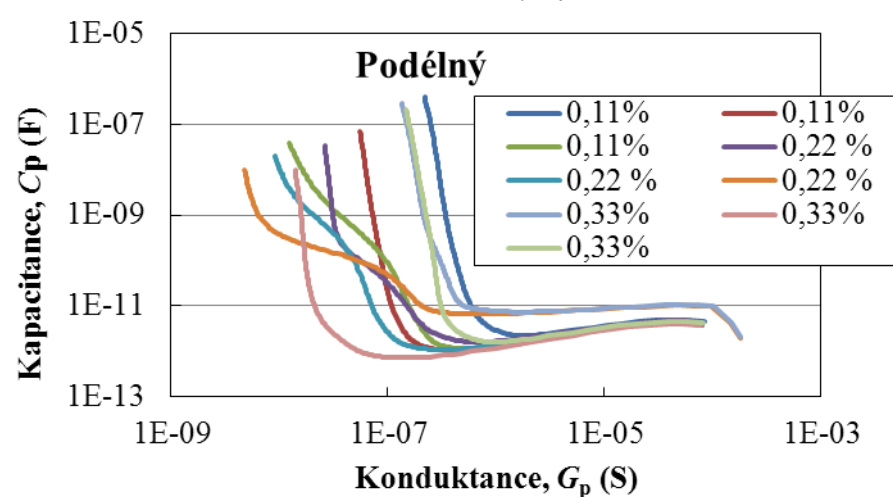
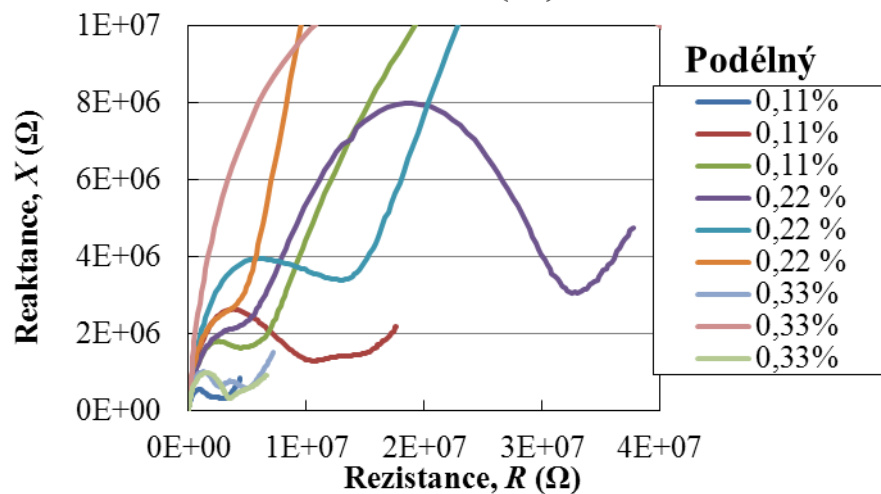
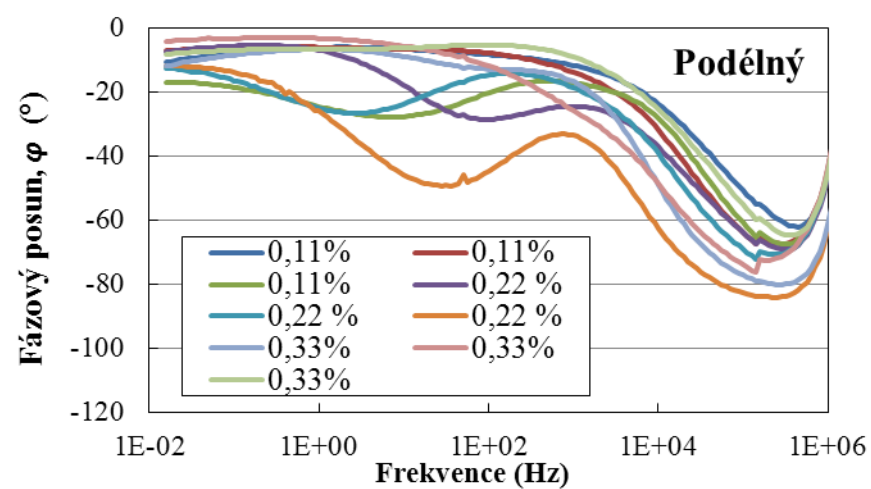
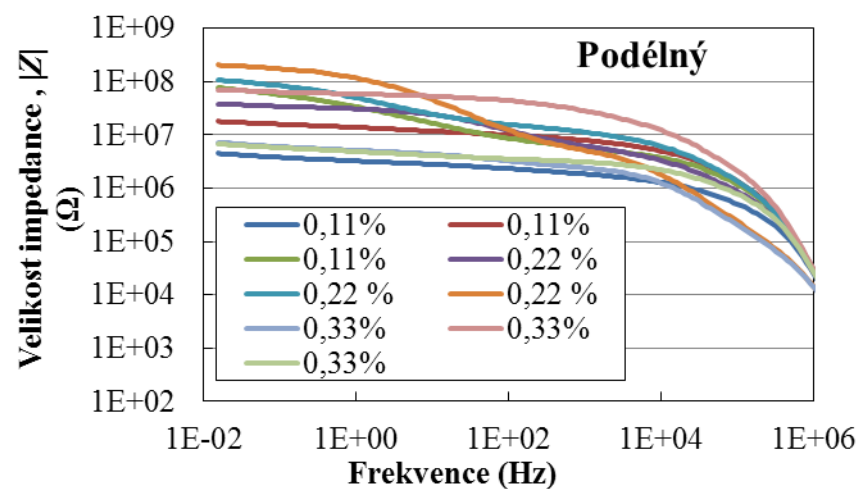
**Příloha 4a: Dielektrické vlastnosti druhé série vzorků s grafitovým práškem – podélný směr**



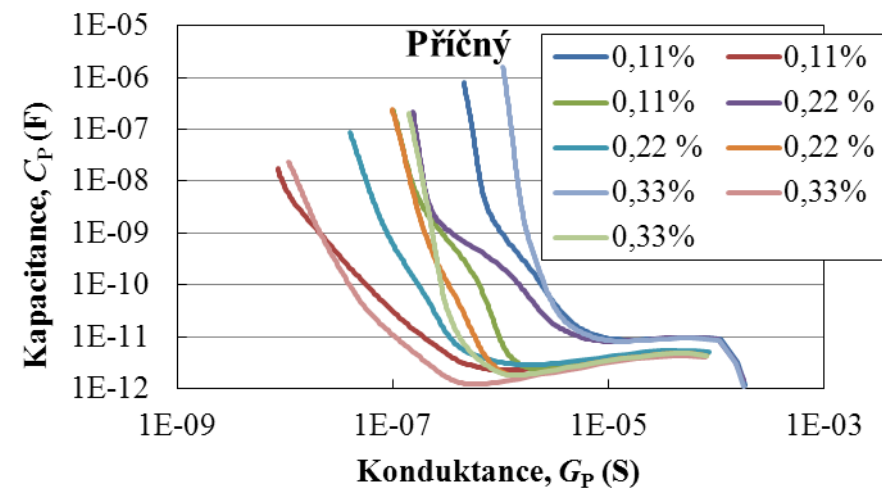
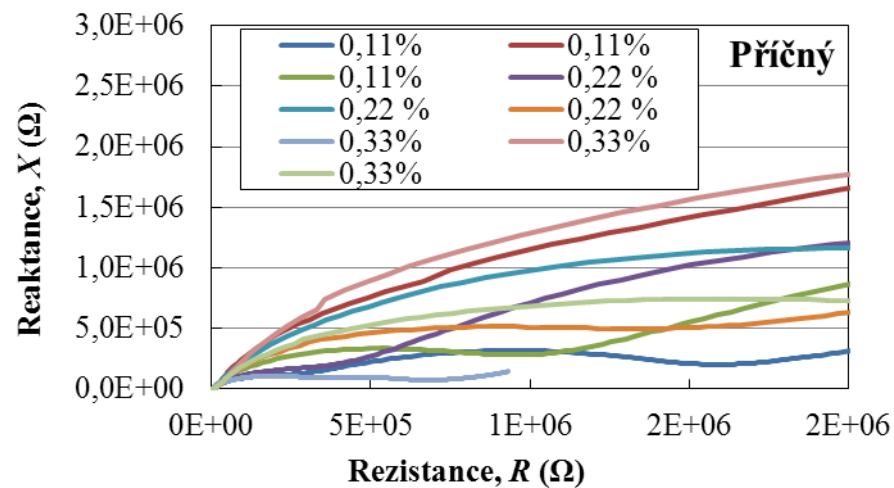
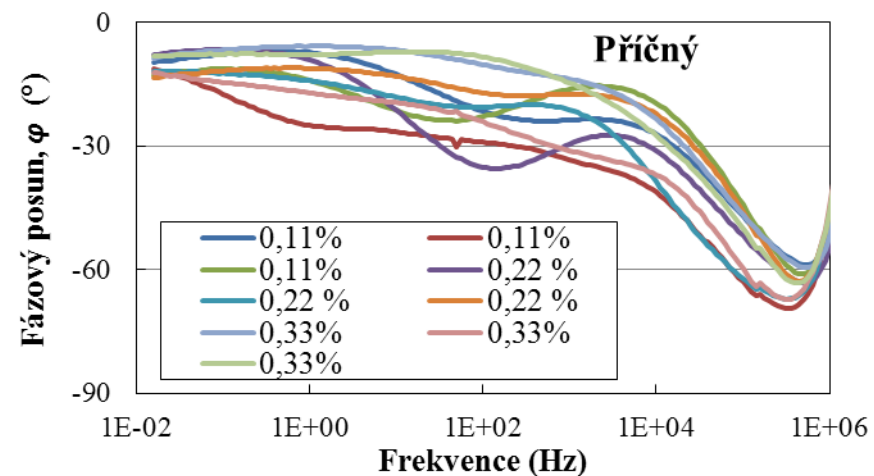
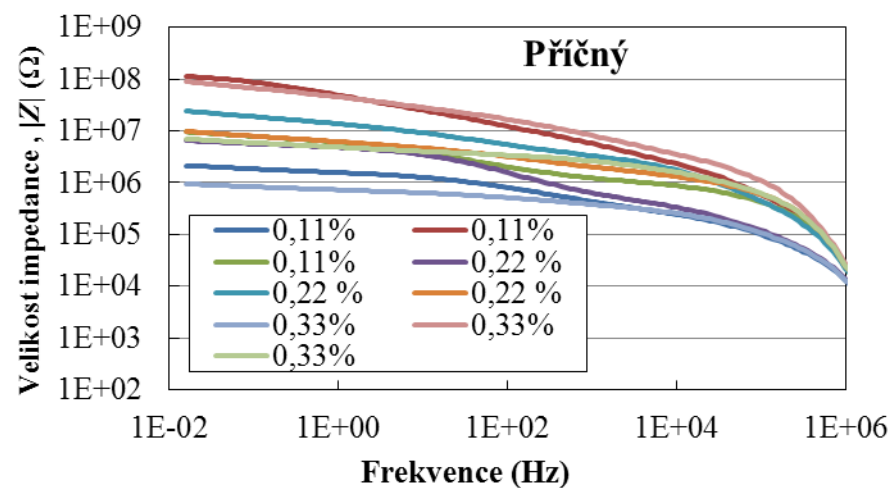
Příloha 4b: Dielektrické vlastnosti druhé série vzorků s grafitovým práškem – příčný směr



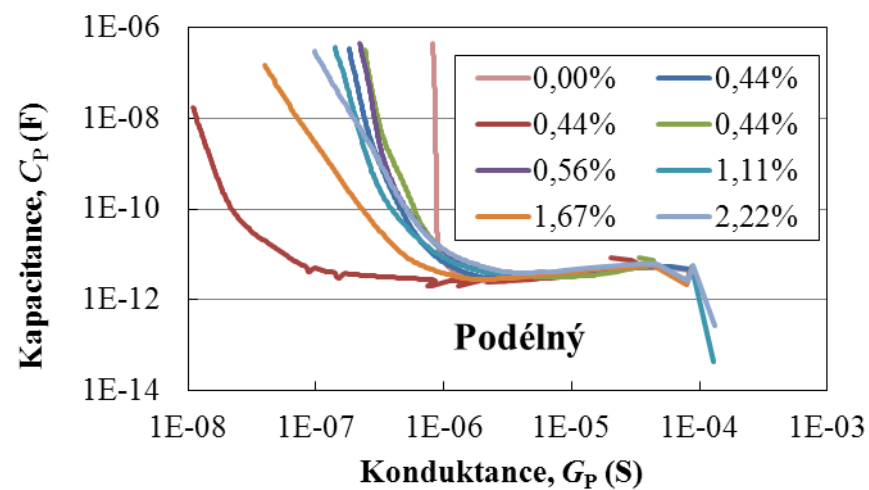
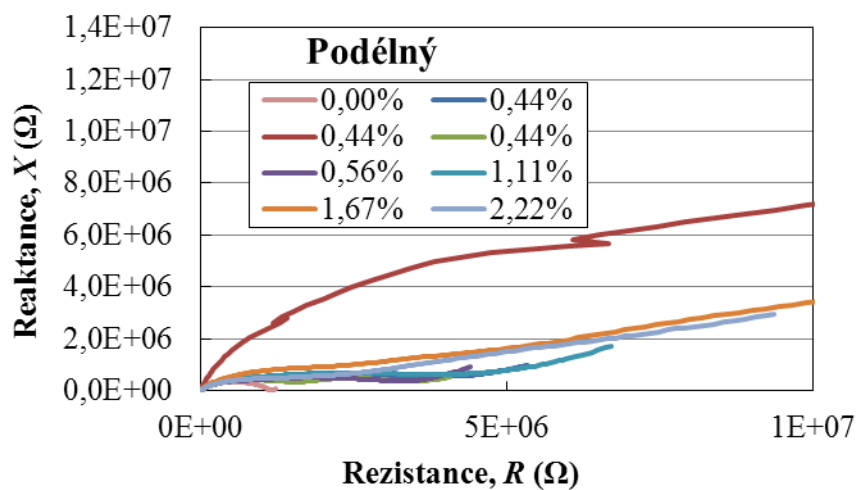
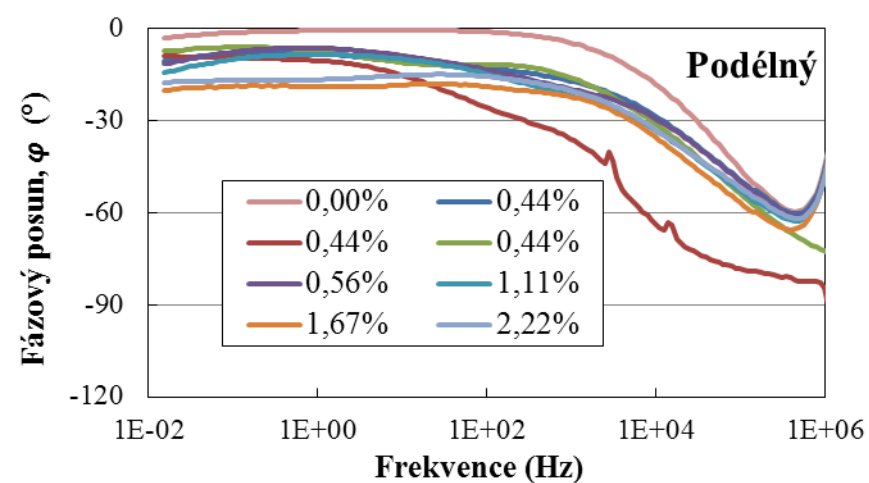
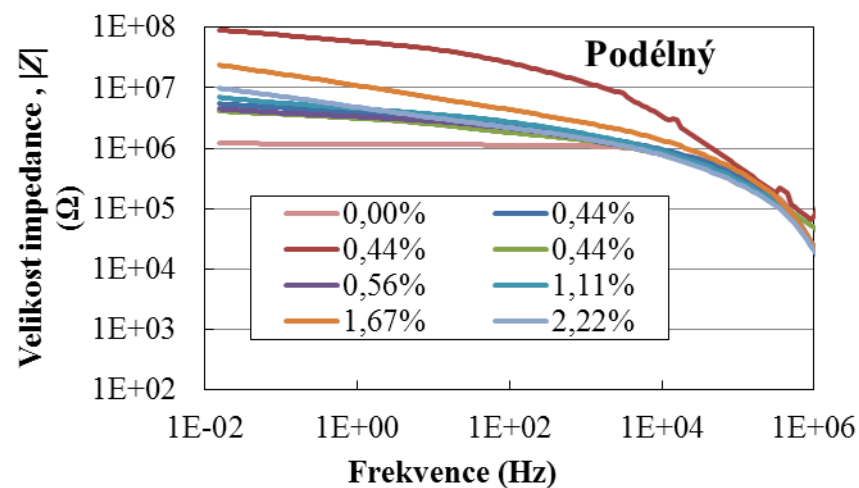
Příloha 5a: Dielektrické vlastnosti první série vzorků s uhlíkovými vlákny – podélný směr



**Příloha 5b: Dielektrické vlastnosti první série vzorků s uhlíkovými vlákny – příčný směr**

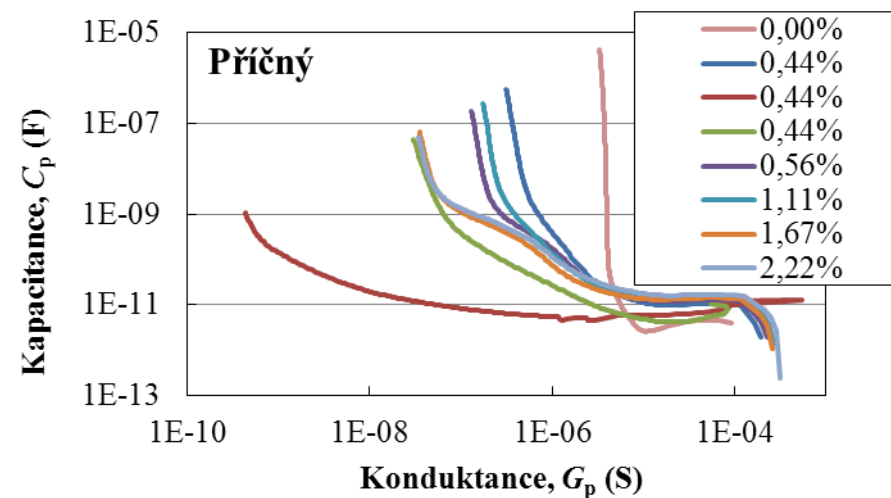
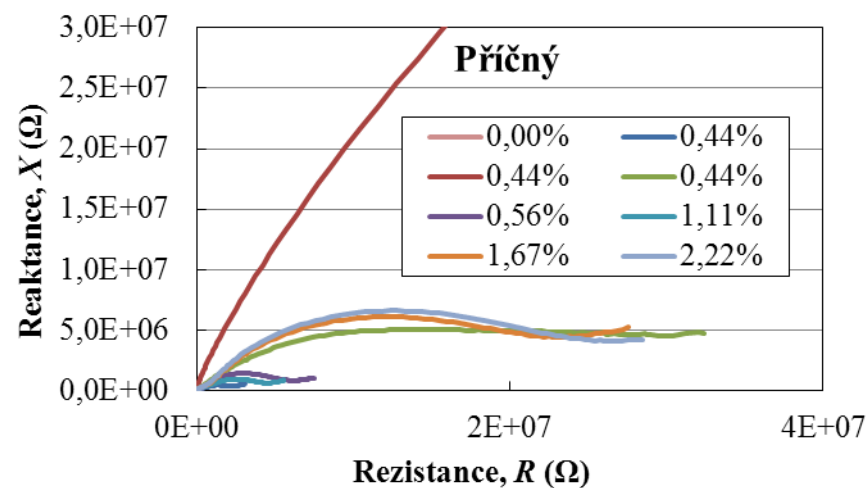
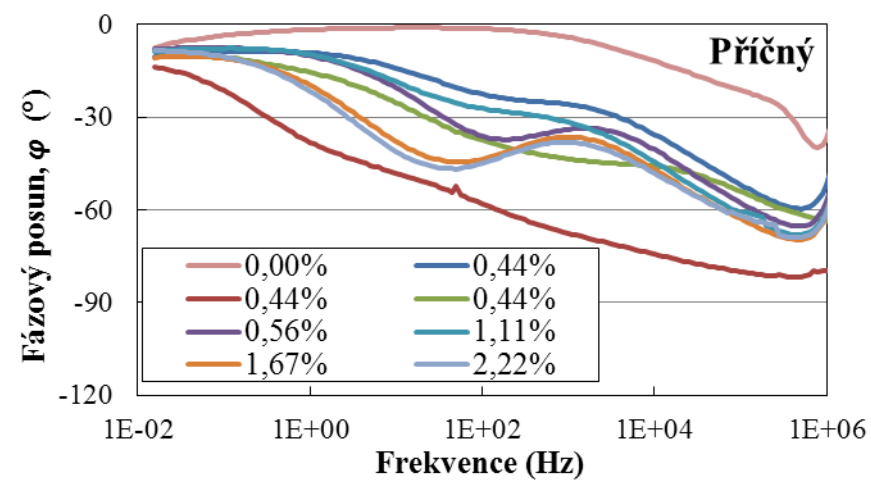
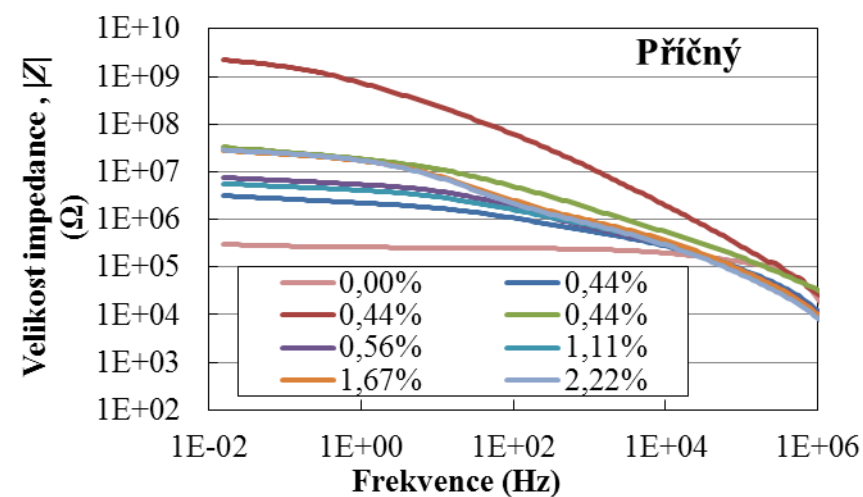


Příloha 6a: Dielektrické vlastnosti druhé série a části první série vzorků s uhlíkovými vlákny – podélný směr

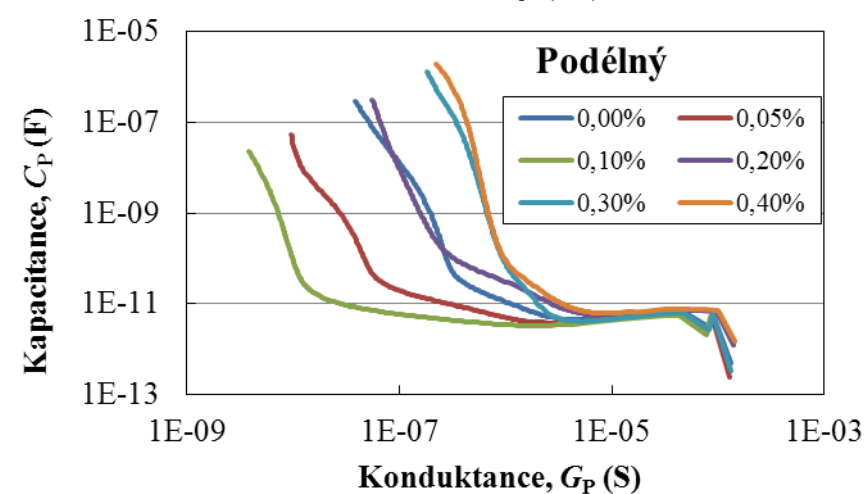
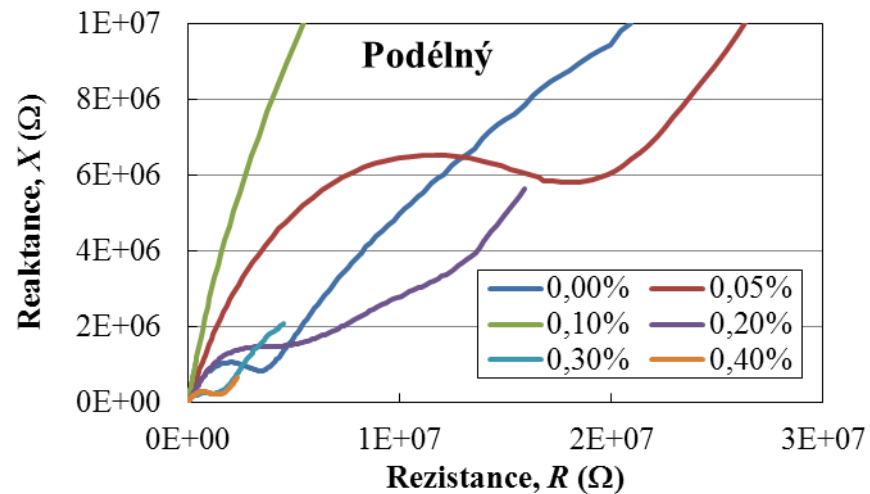
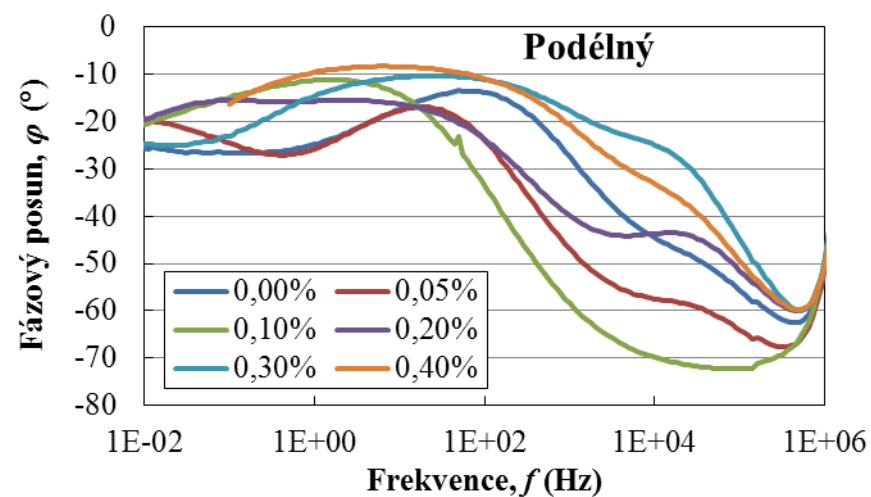
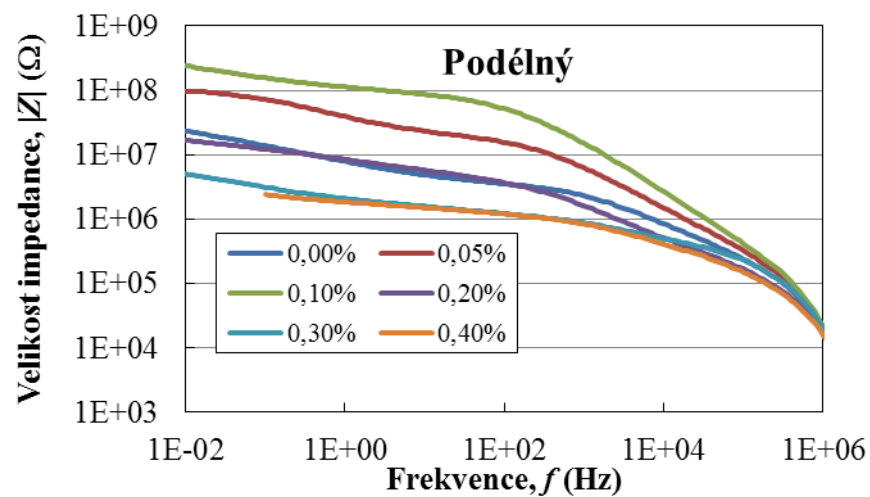




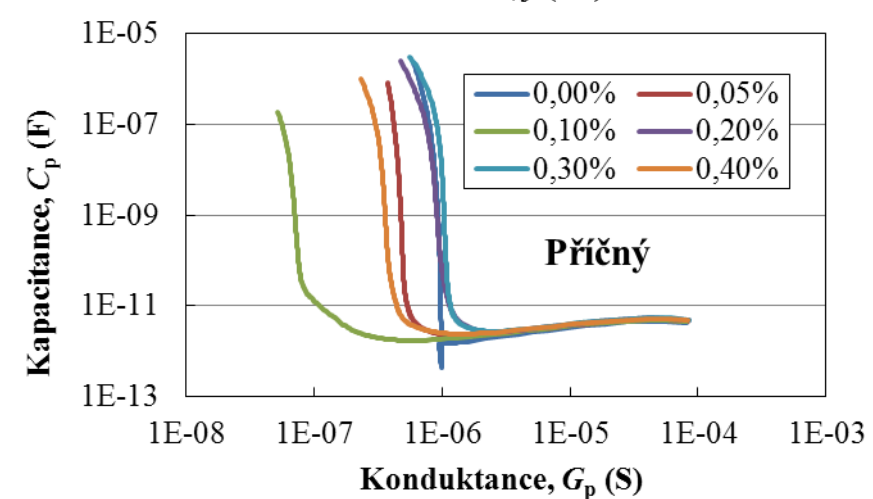
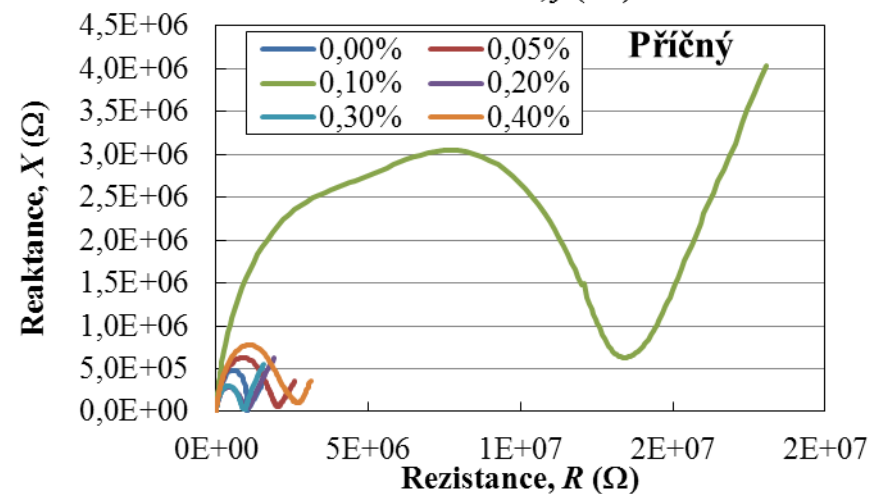
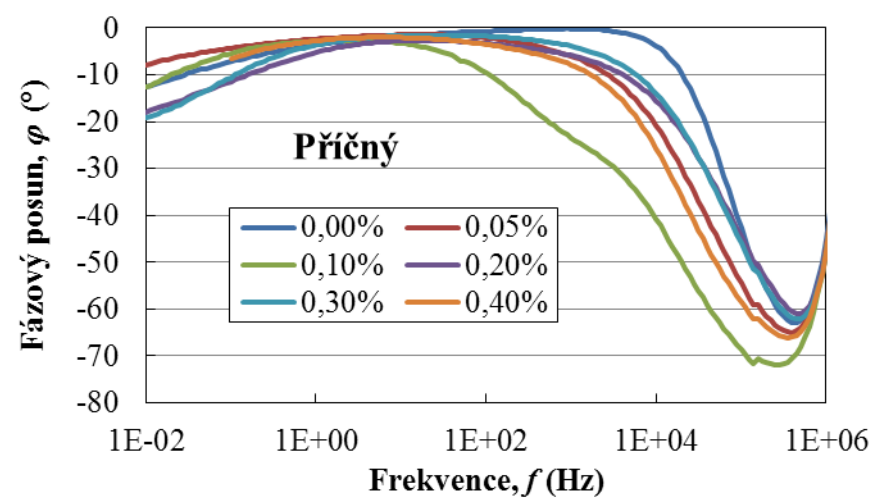
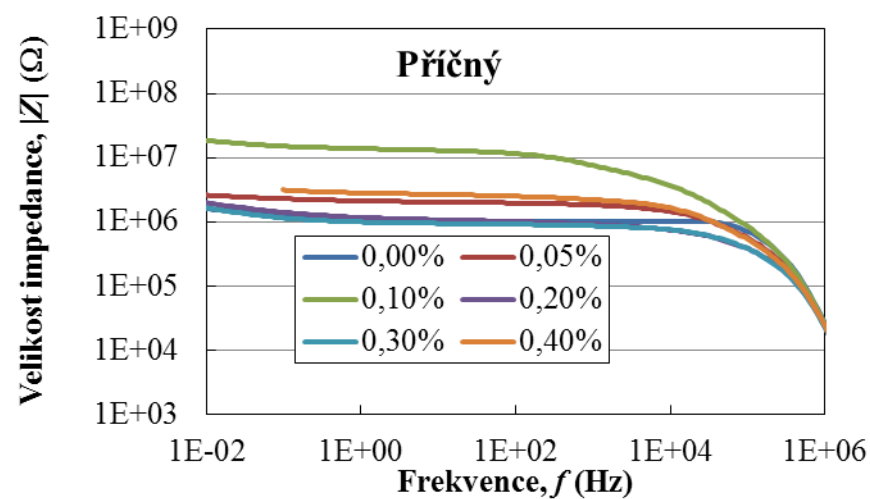
Příloha 6b: Dielektrické vlastnosti druhé série a části první série vzorků s uhlíkovými vlákny – příčný směr



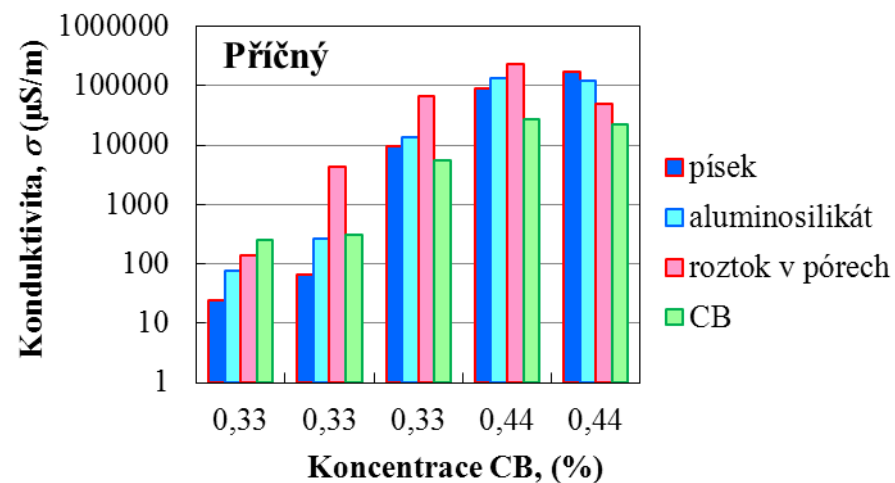
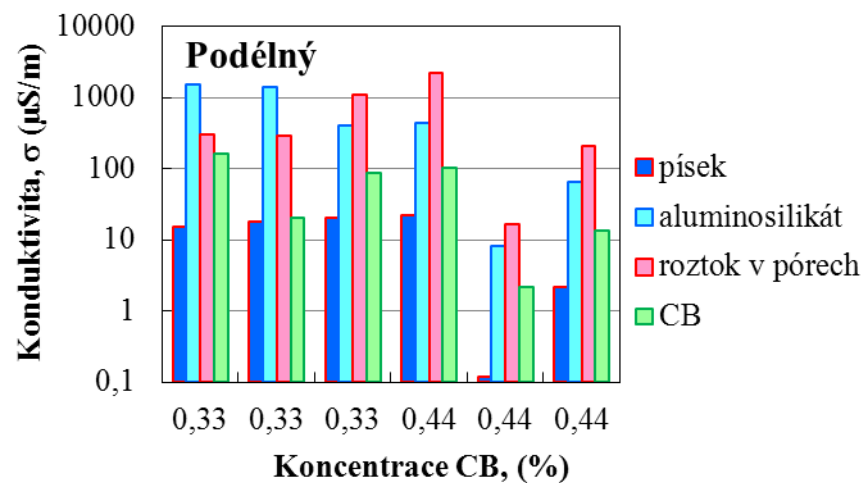
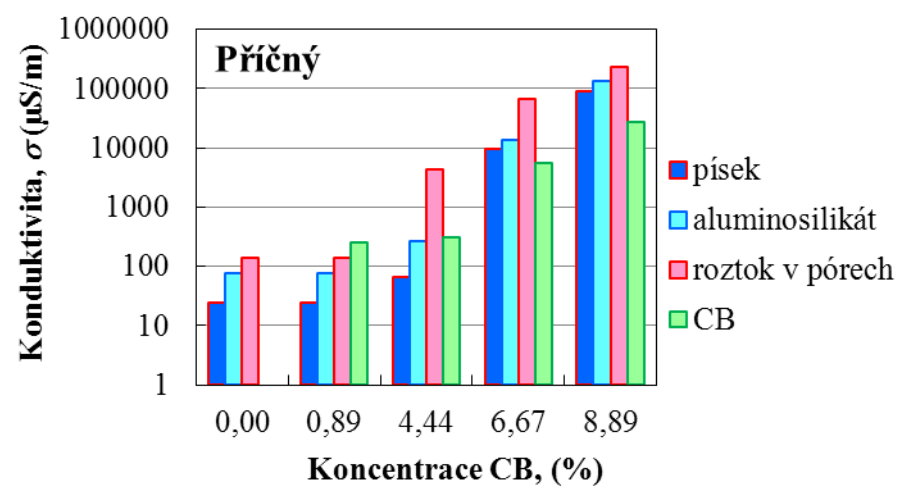
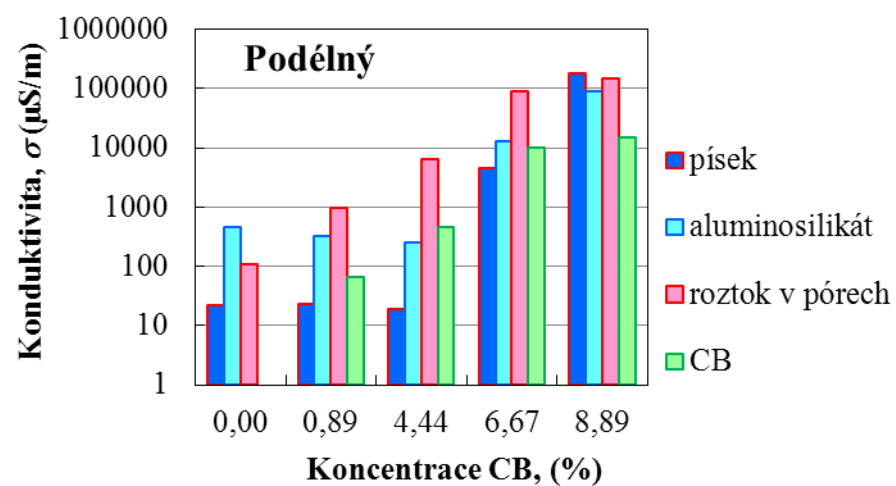
Příloha 7a: Dielektrické vlastnosti vzorků s uhlíkovými nanotrubičkami – podélný směr



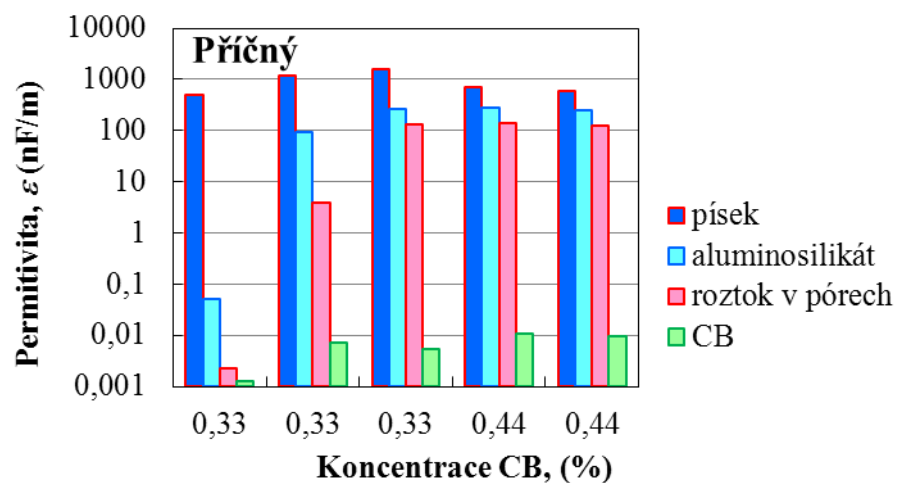
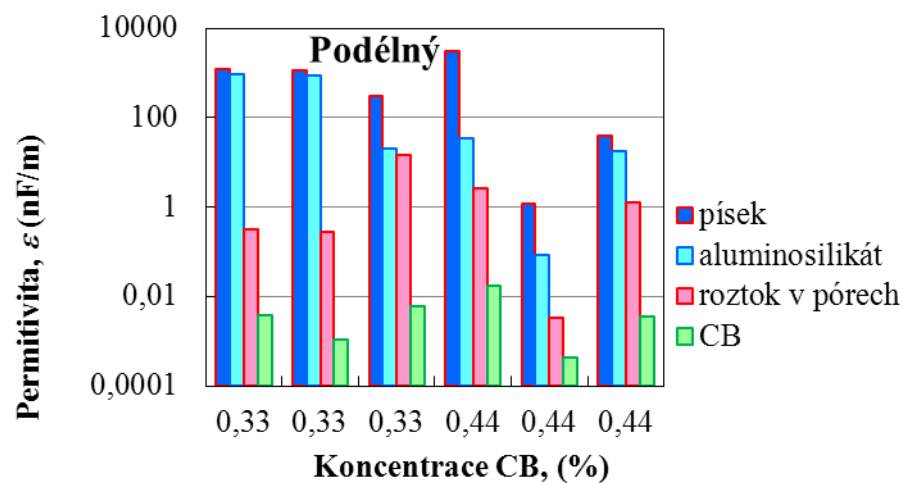
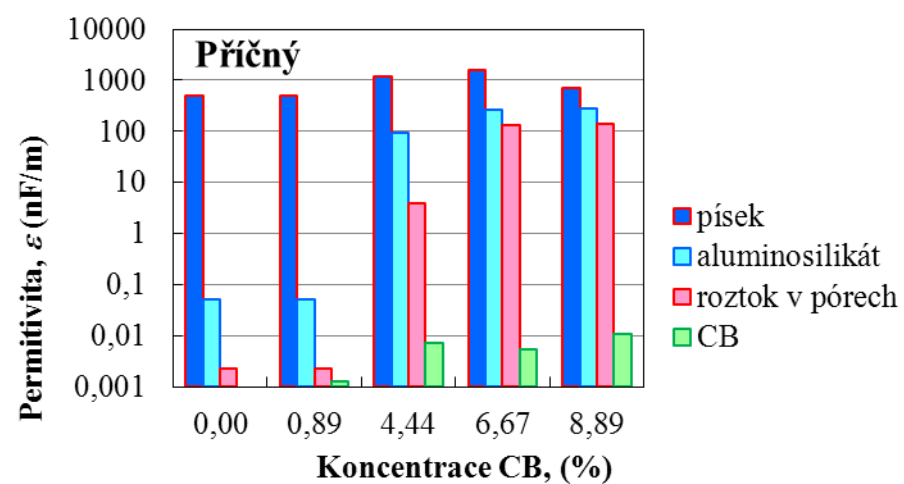
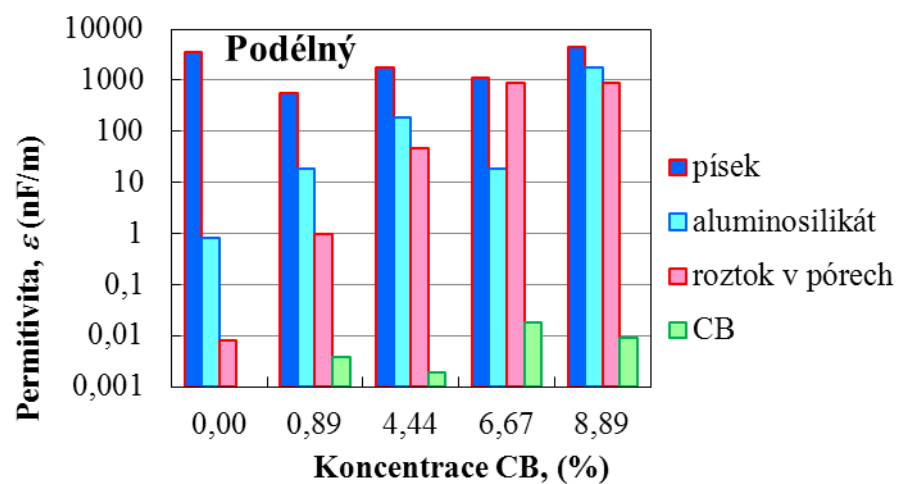
Příloha 7b: Dielektrické vlastnosti vzorků s uhlíkovými nanotrubičkami – příčný směr



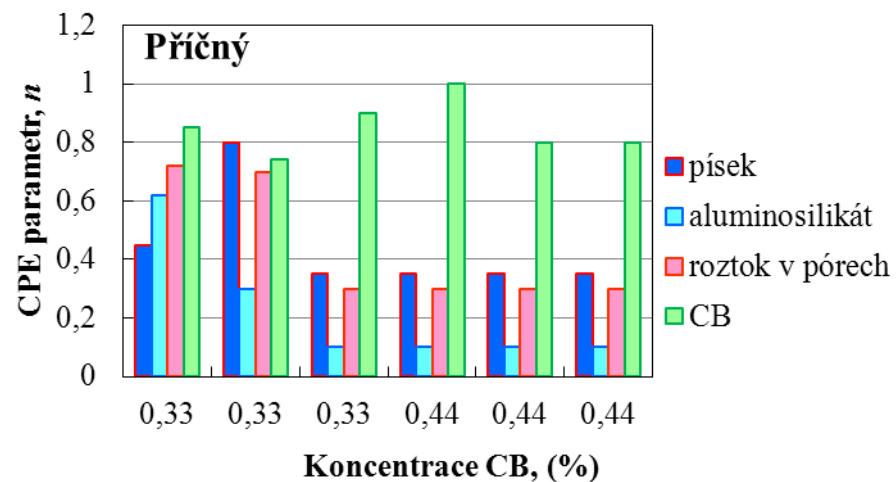
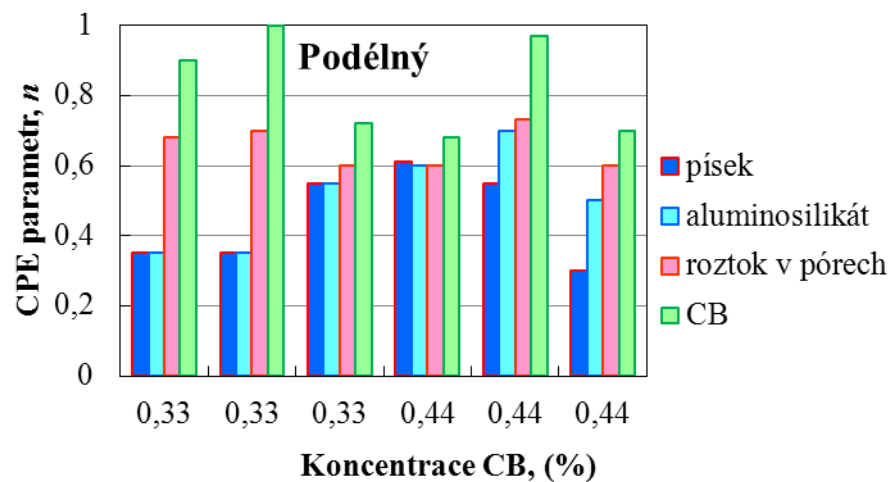
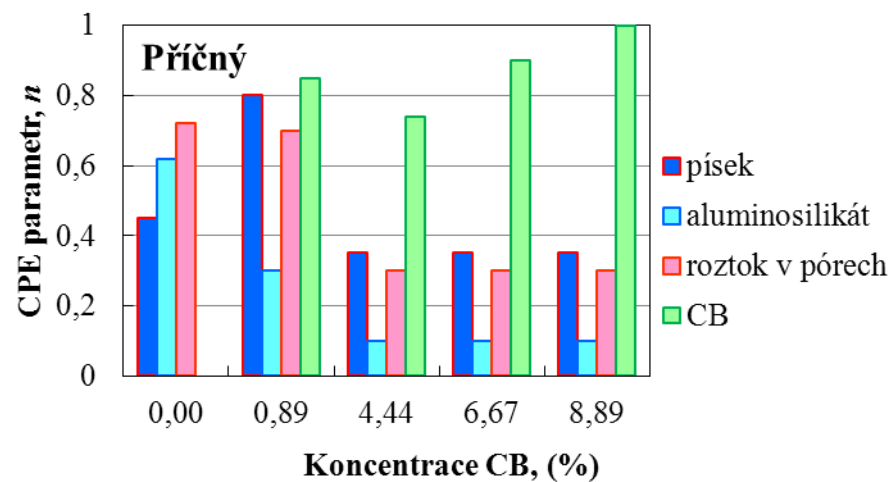
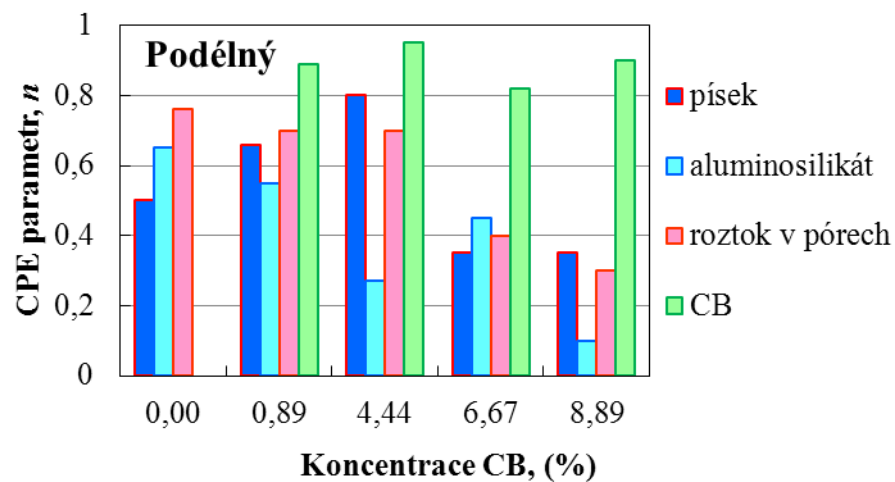
Příloha 8a: Měrné elektrické vodivosti (konduktivity) vzorků s uhlíkovými sazezi



Příloha 8b: Permittivity vzorků s uhlíkovými sazenmi

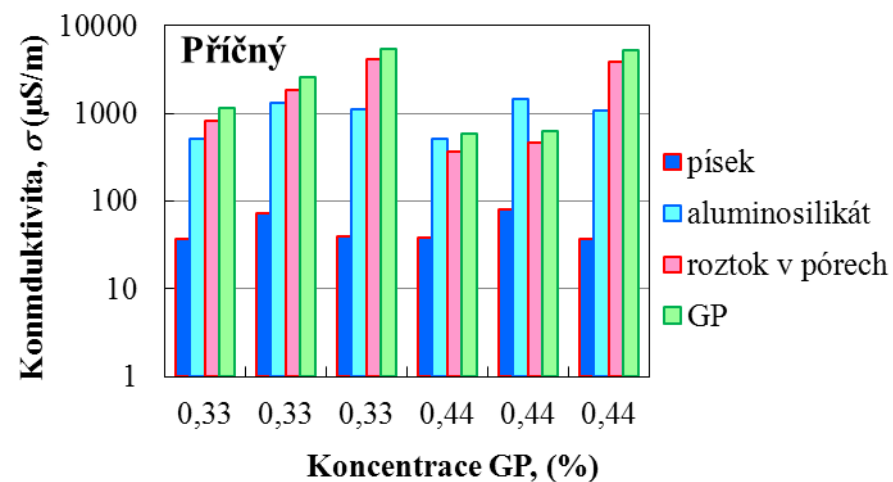
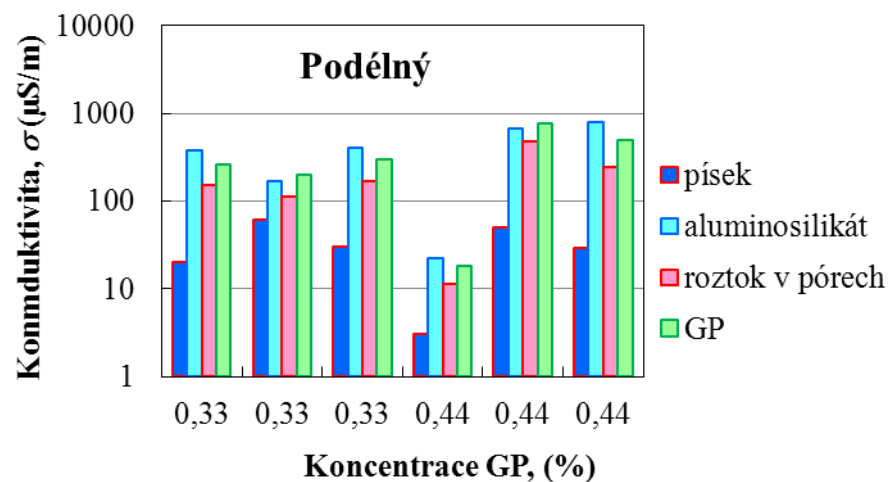
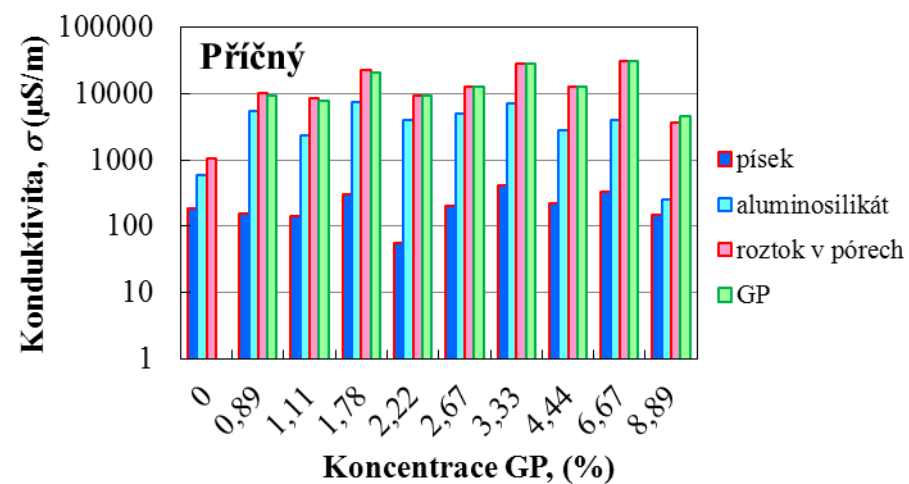
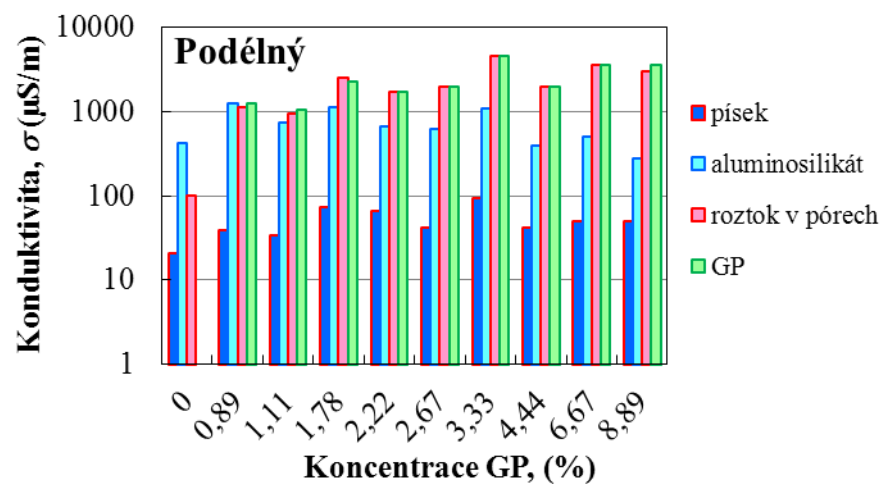


Příloha 8c: CPE parametry  $n$  vzorků s uhlíkovými sazemí

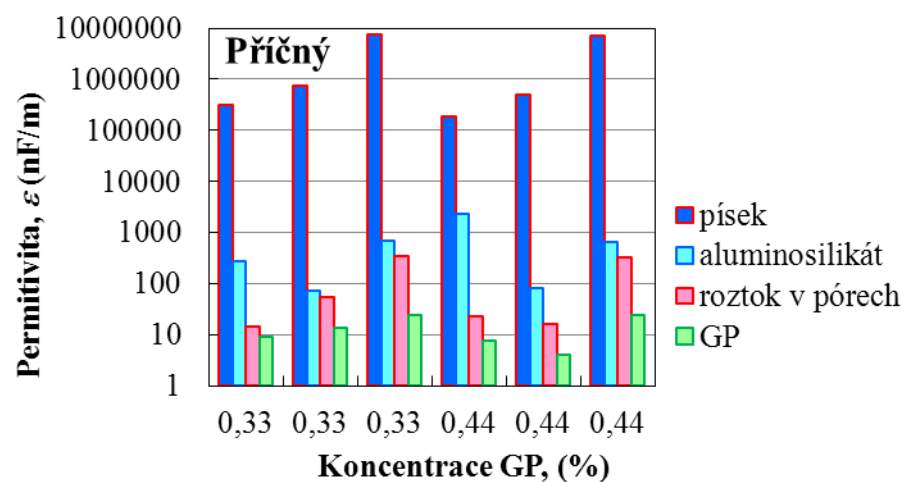
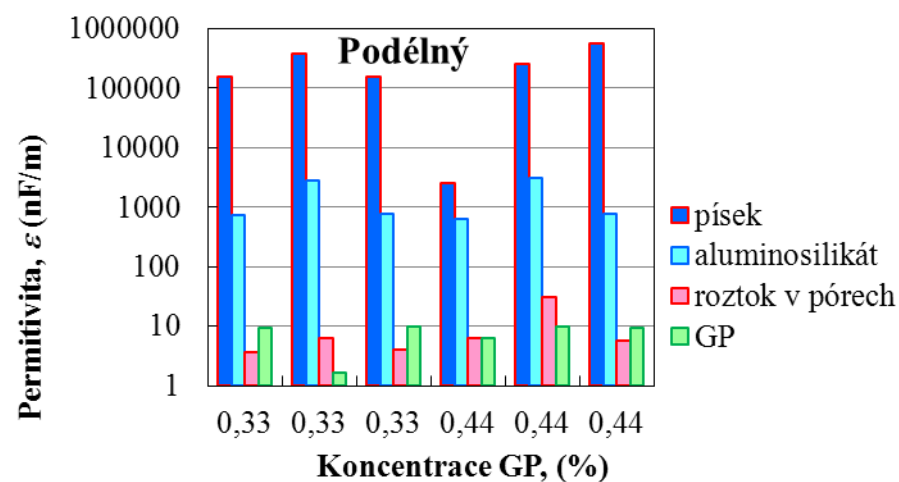
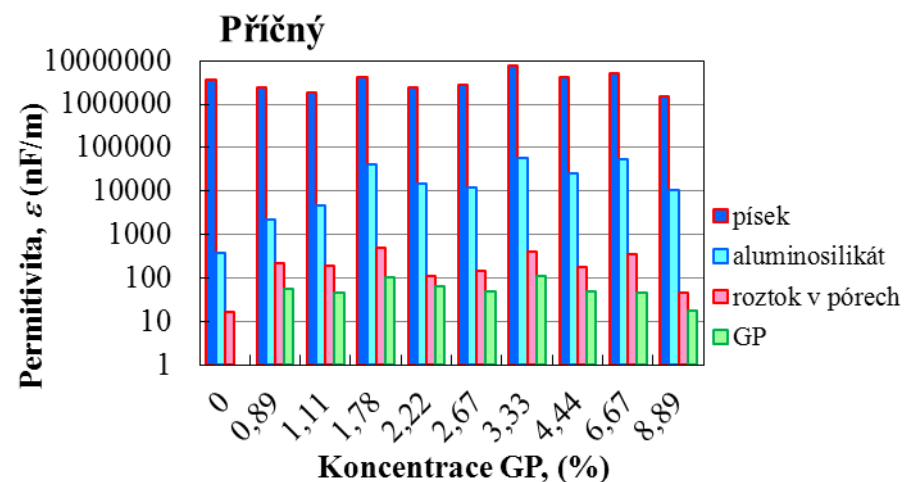
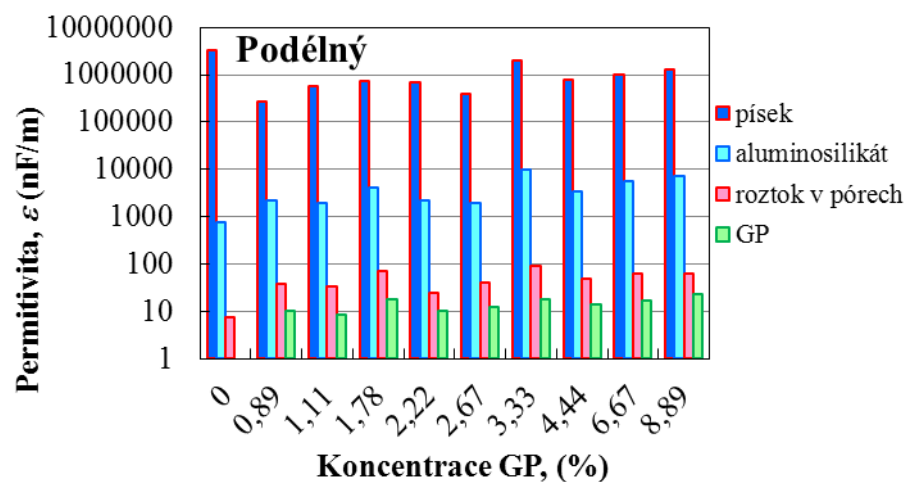




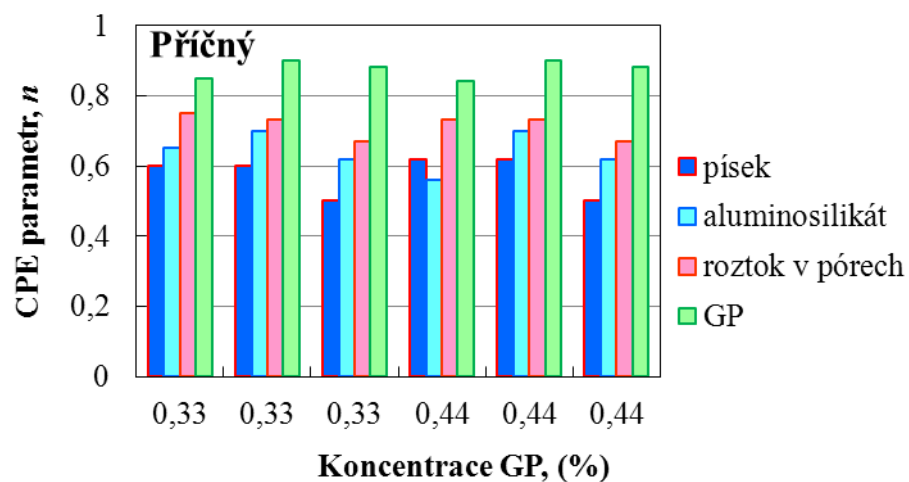
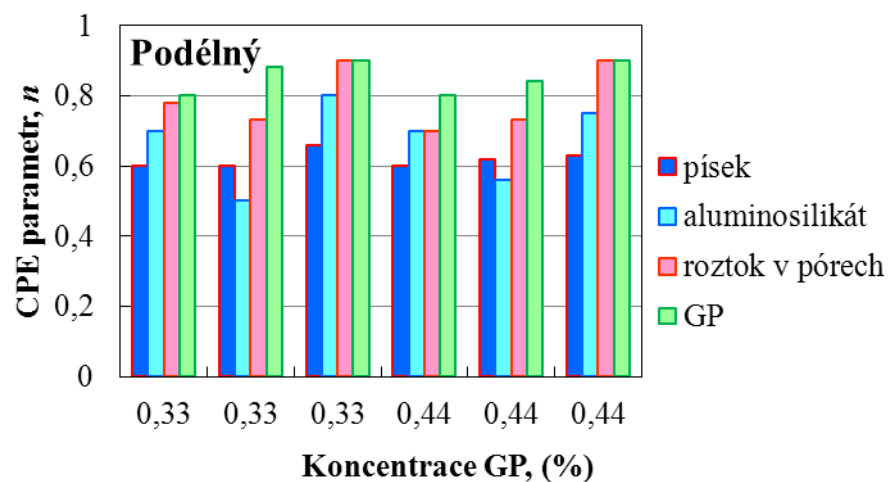
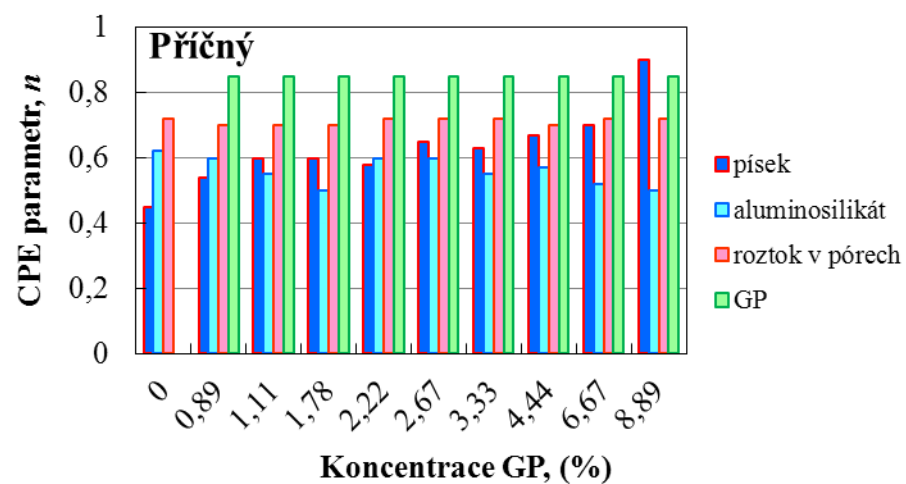
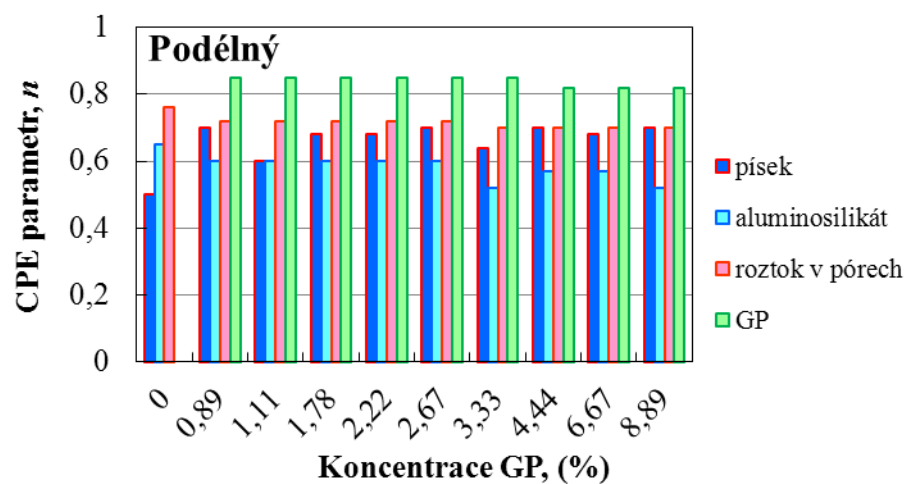
Příloha 9a: Měrné elektrické vodivosti (konduktivity) vzorků s grafitovým práškem



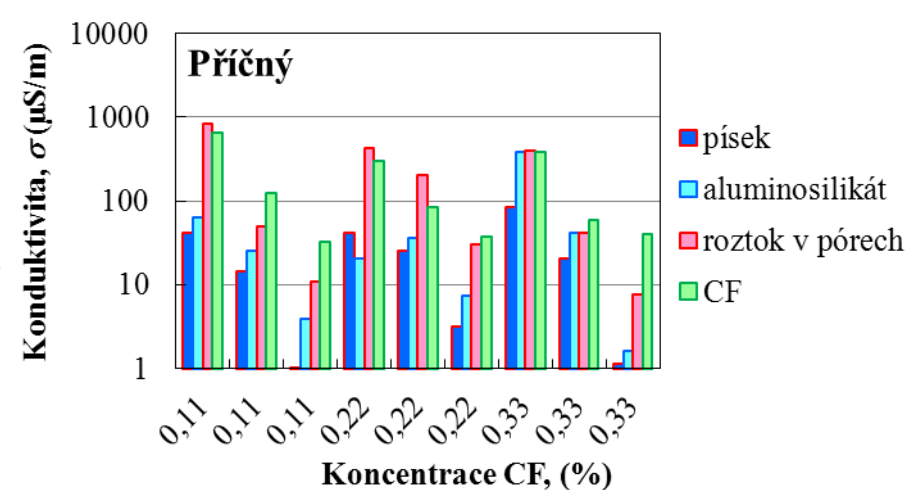
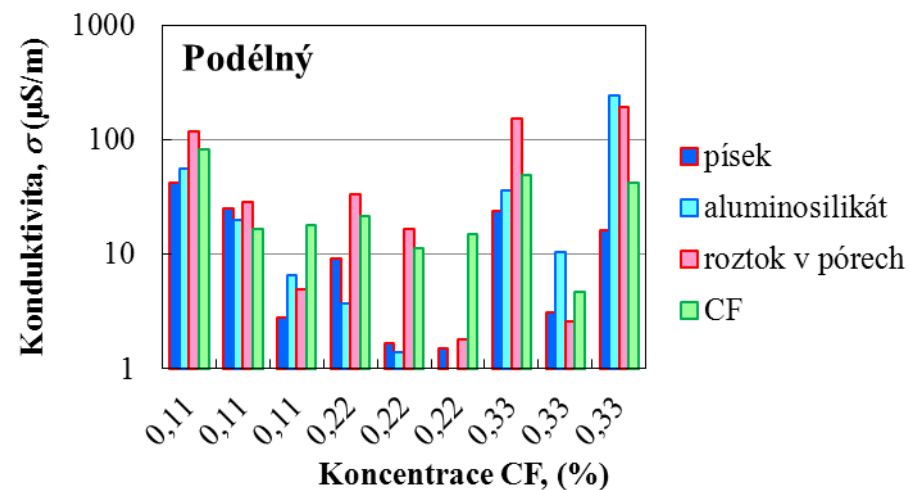
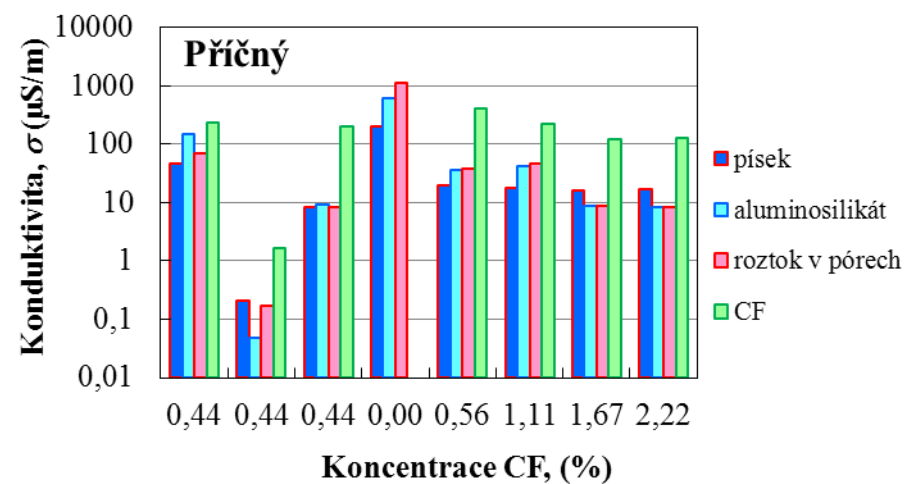
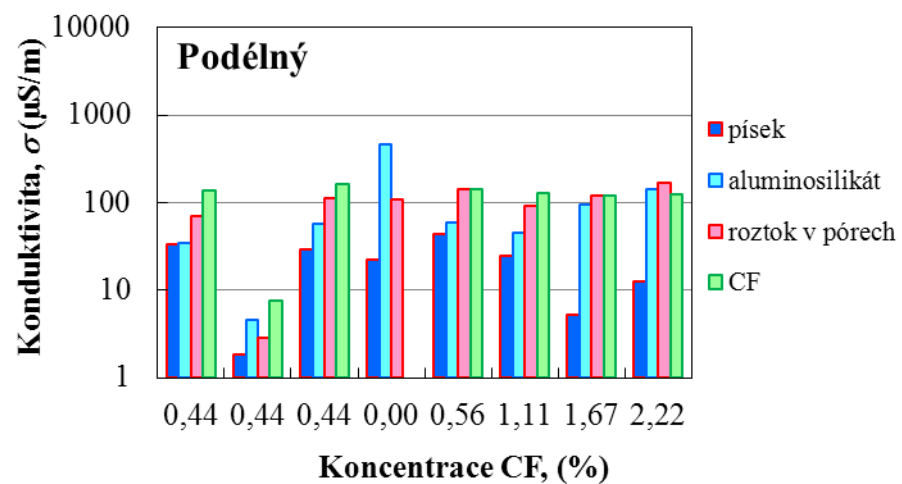
**Příloha 9b: Permittivity vzorků s grafitovým práškem**



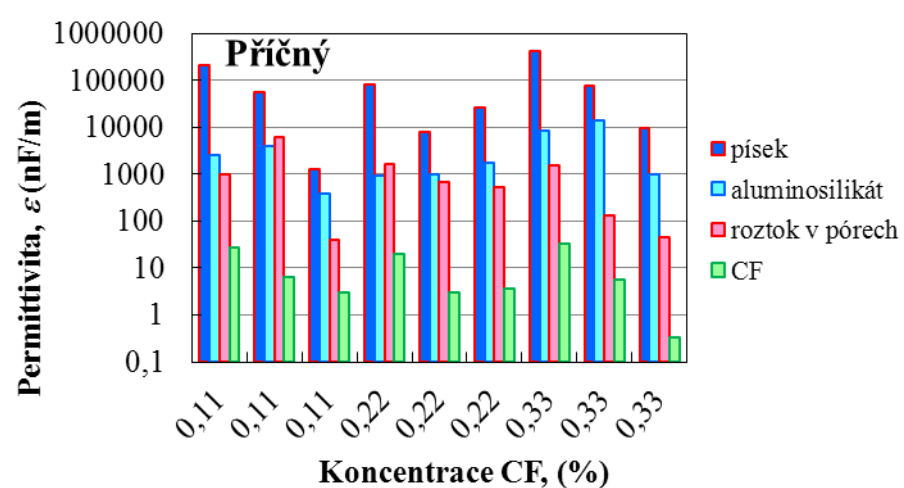
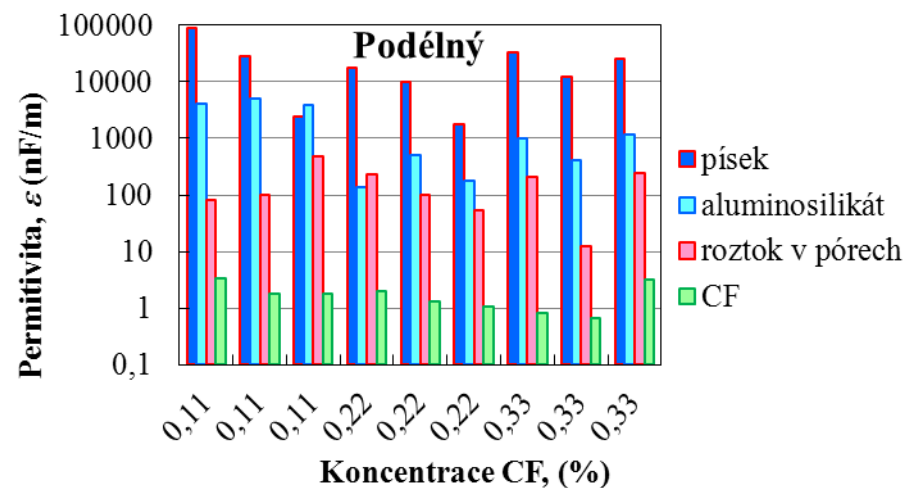
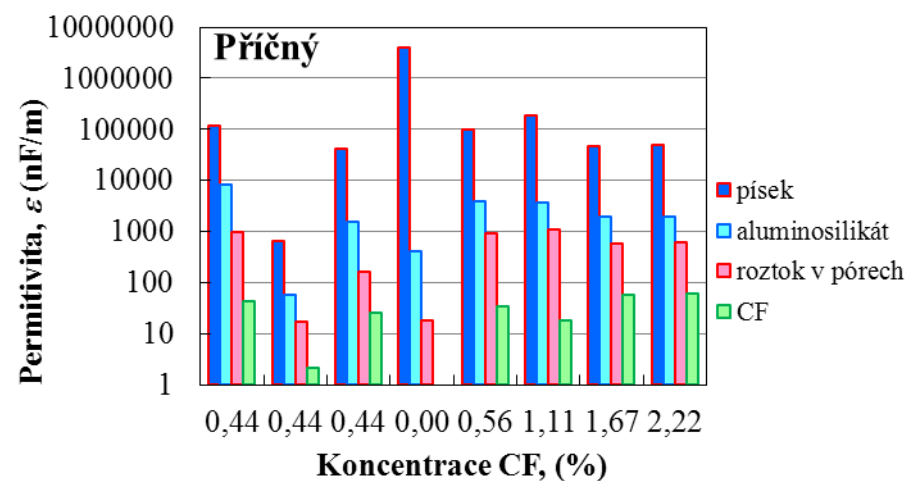
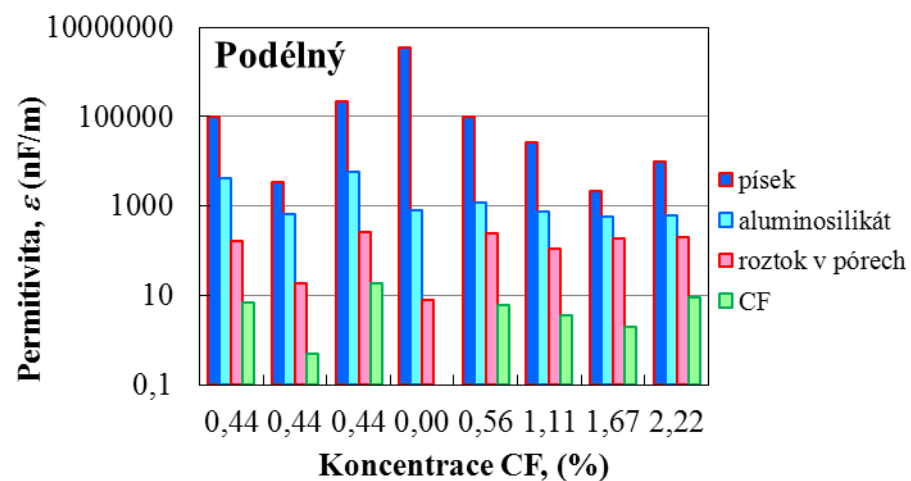
Příloha 9c: CPE parametry  $n$  vzorků s grafitovým práškem



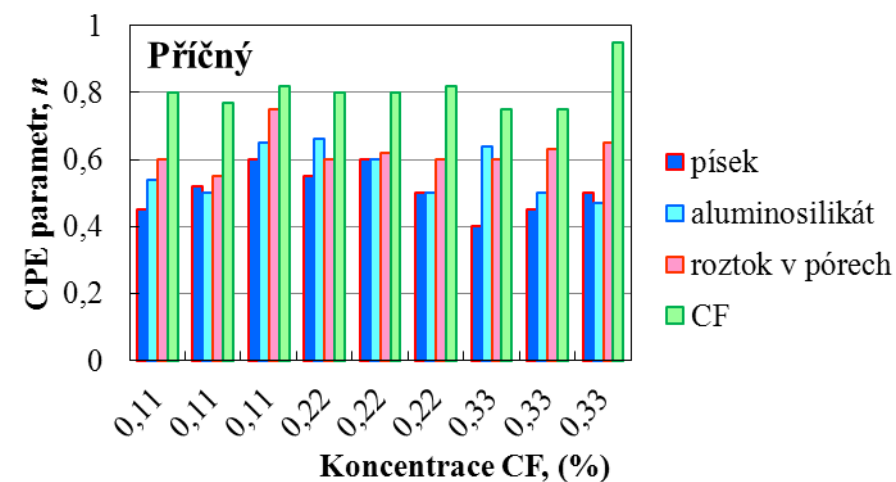
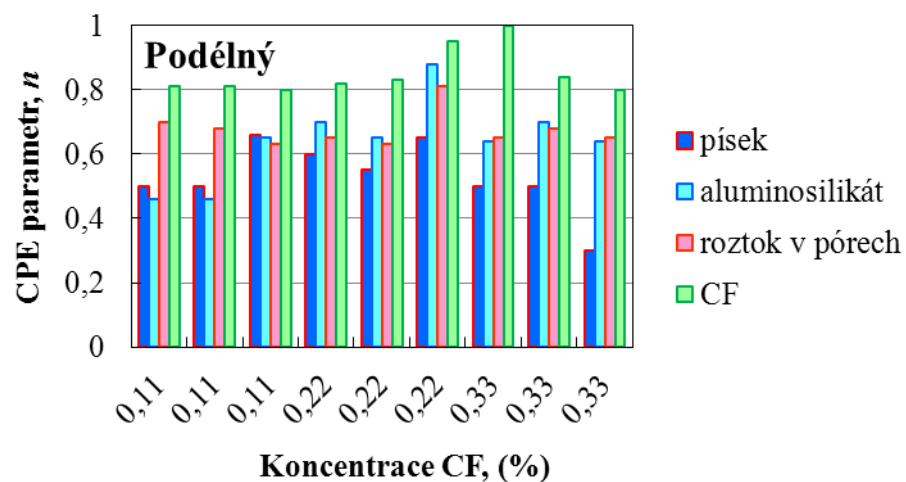
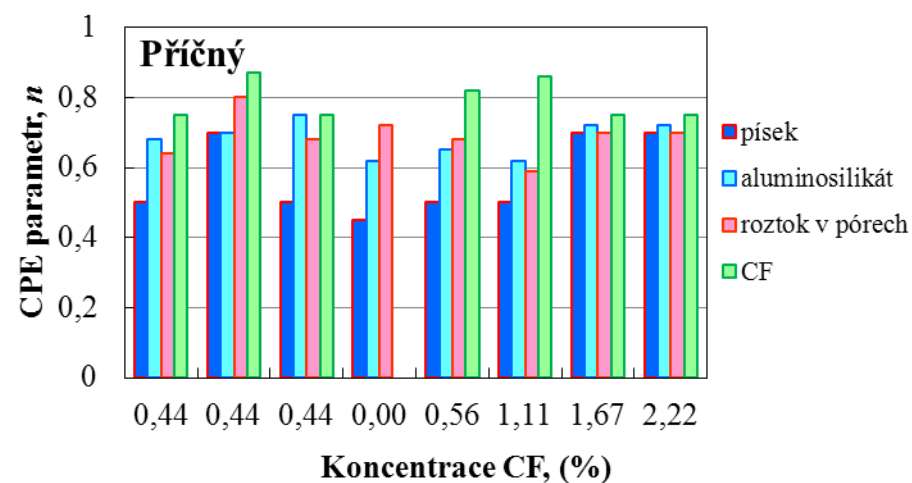
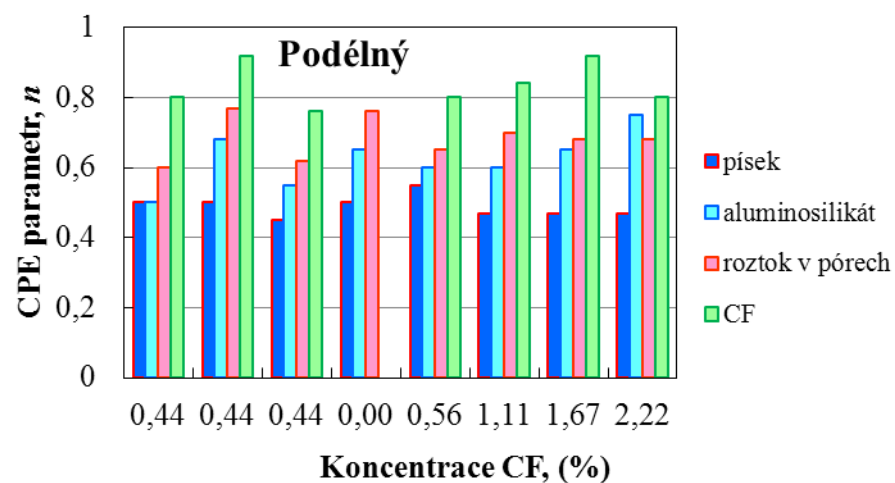
**Příloha 10a: Měrné elektrické vodivosti (konduktivity) vzorků s uhlíkovými vlákny**



**Příloha 10b: Permittivity vzorků s uhlíkovými vlákny**

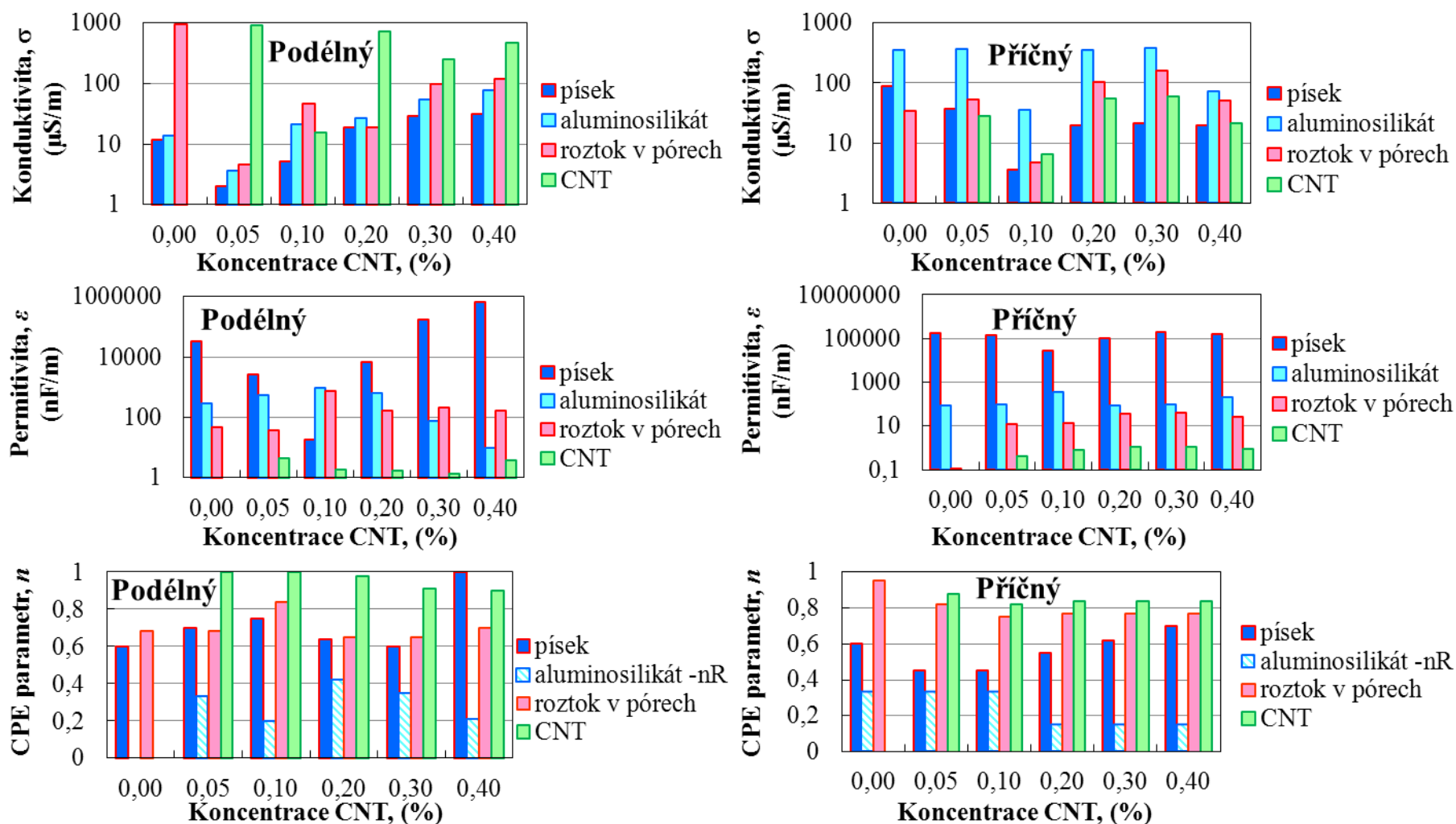


Příloha 10c: CPE parametry  $n$  vzorků s uhlíkovými vlákny

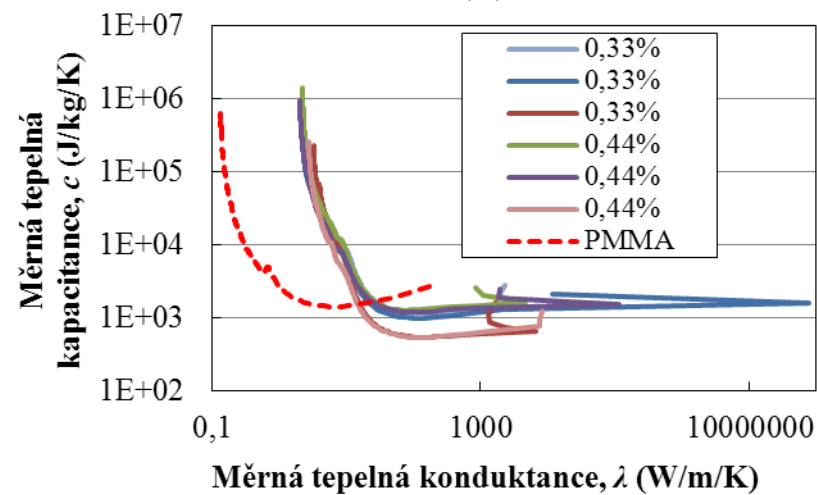
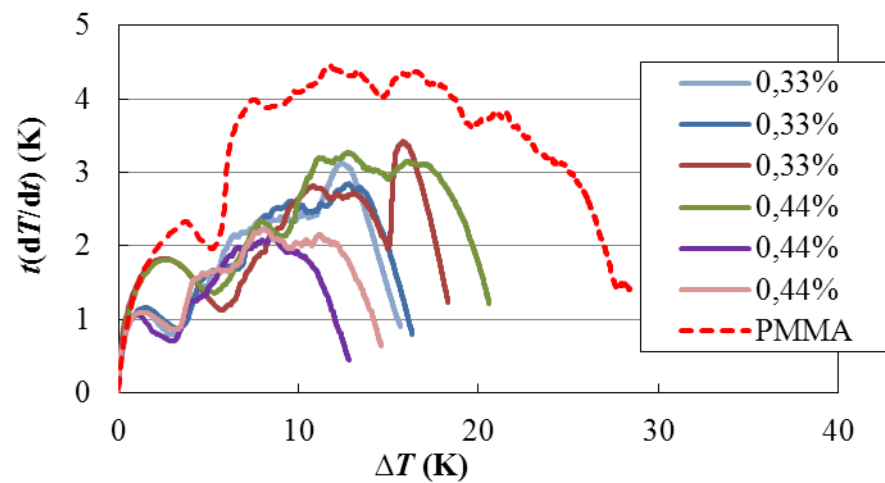
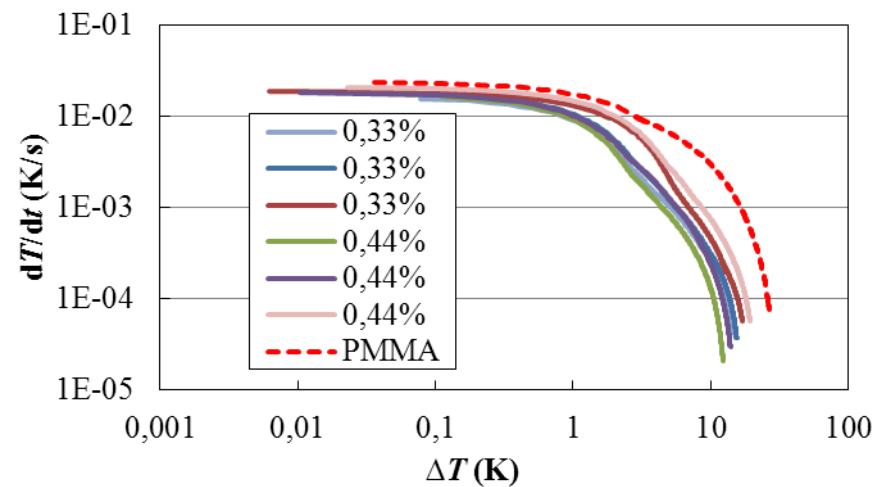
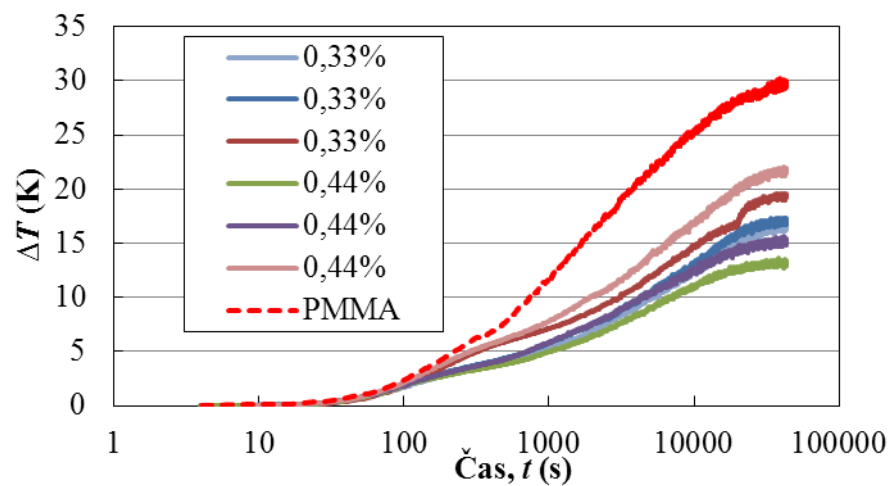




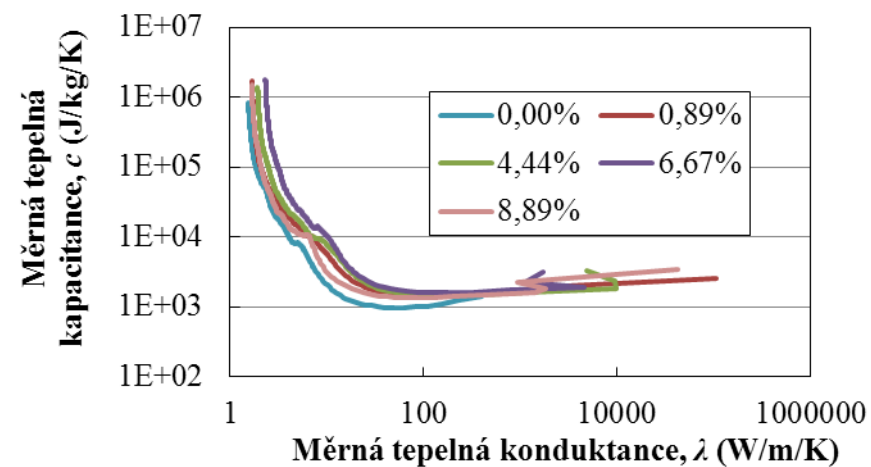
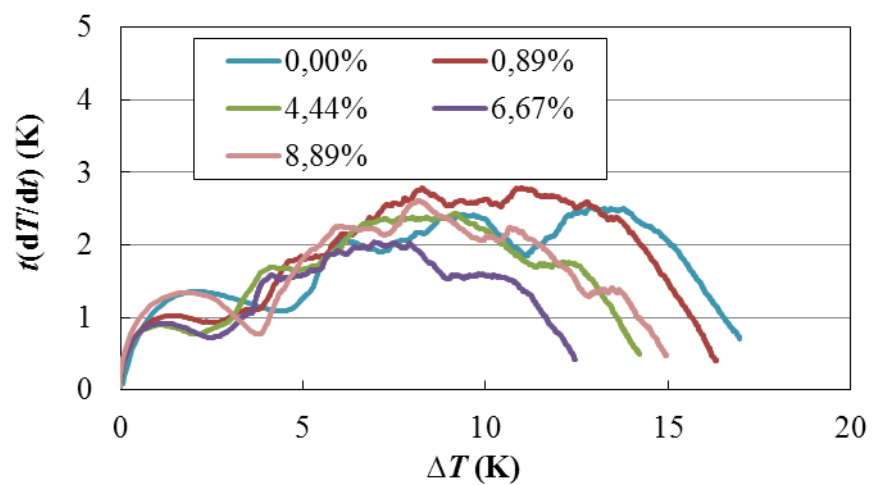
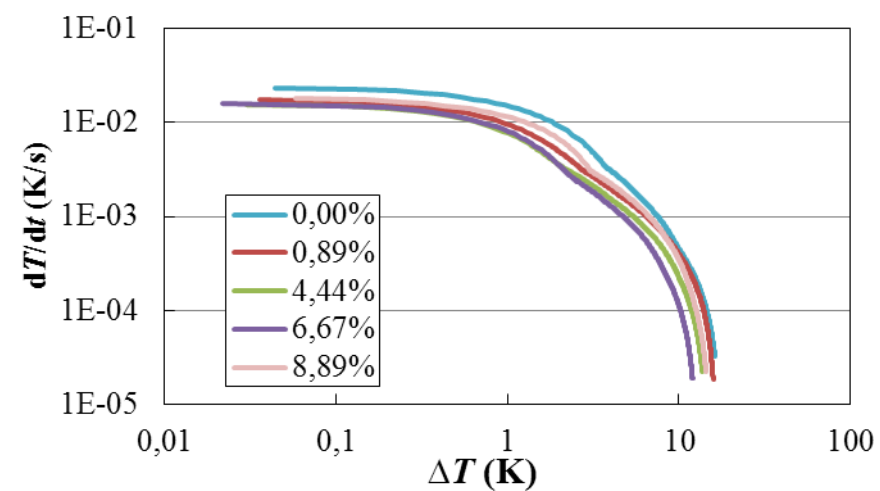
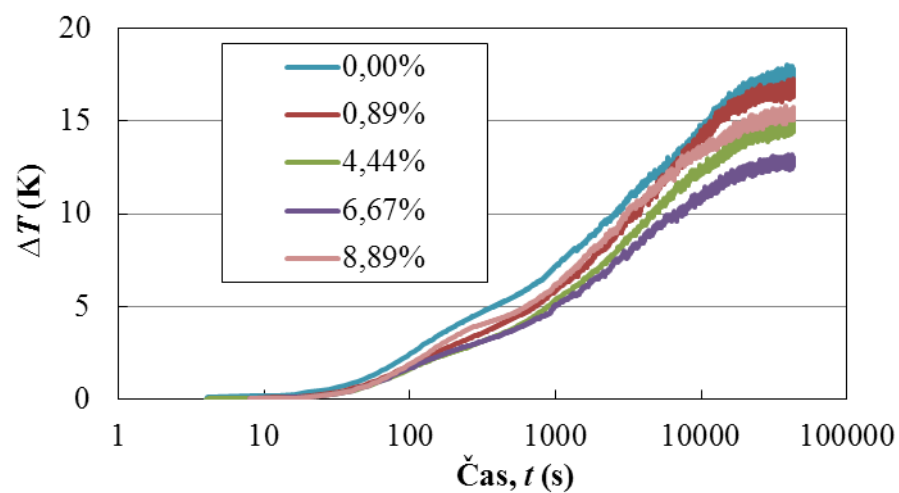
Příloha 11: Měrné elektrické vodivosti (konduktivity), permitivity a CPE parametry  $n$  vzorků s uhlíkovými nanotrubičkami



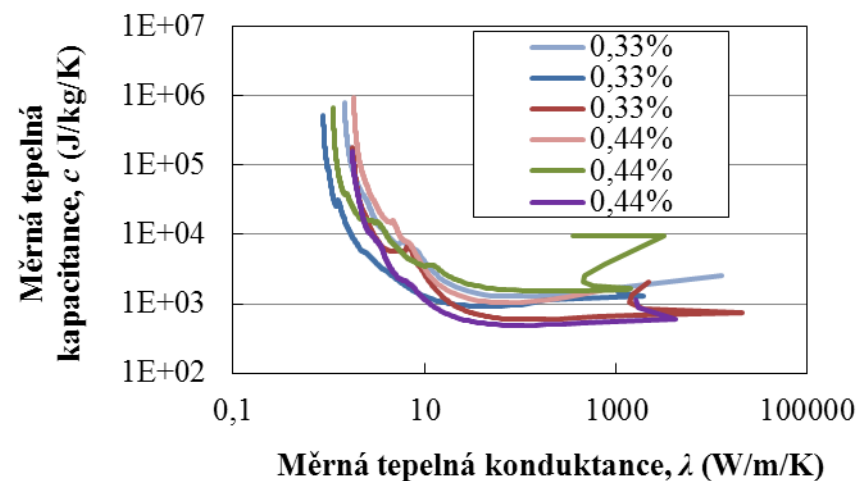
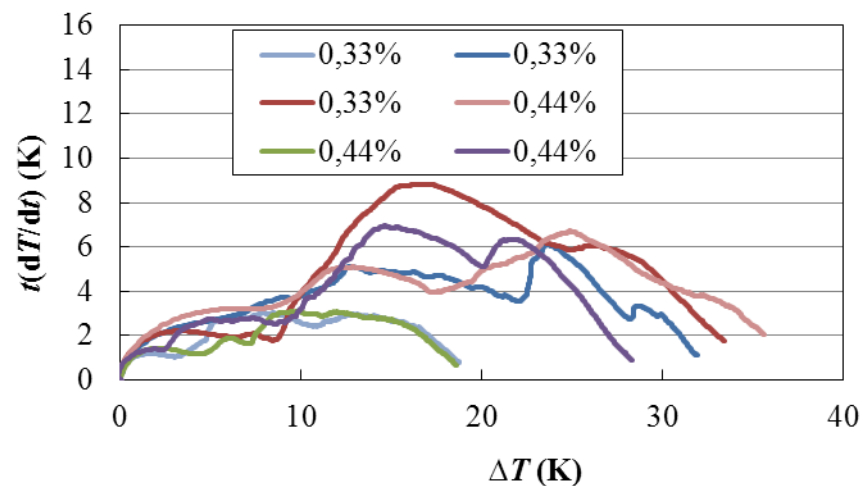
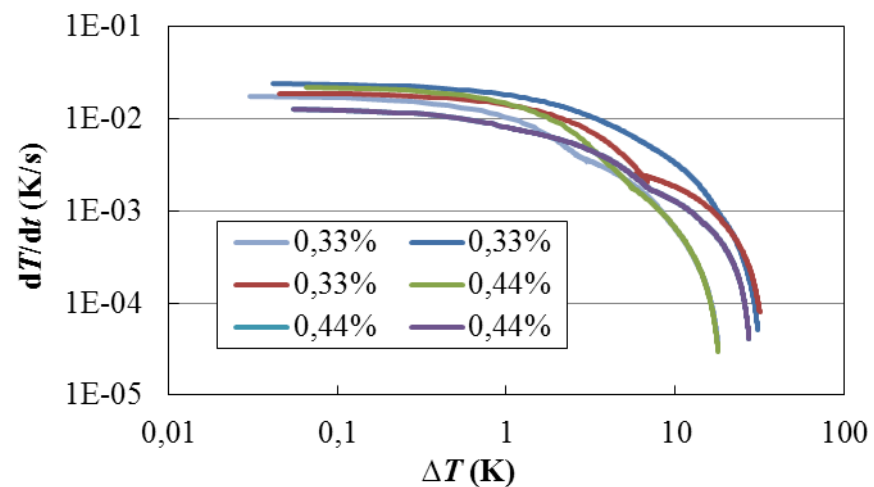
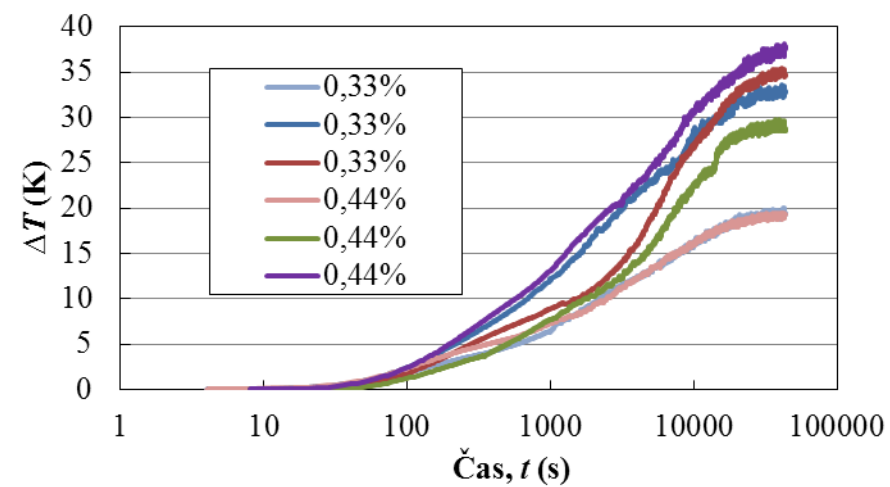
**Příloha 12: Tepelné vlastnosti první série vzorků s uhlíkovými sazemi a vzorku PMMA**



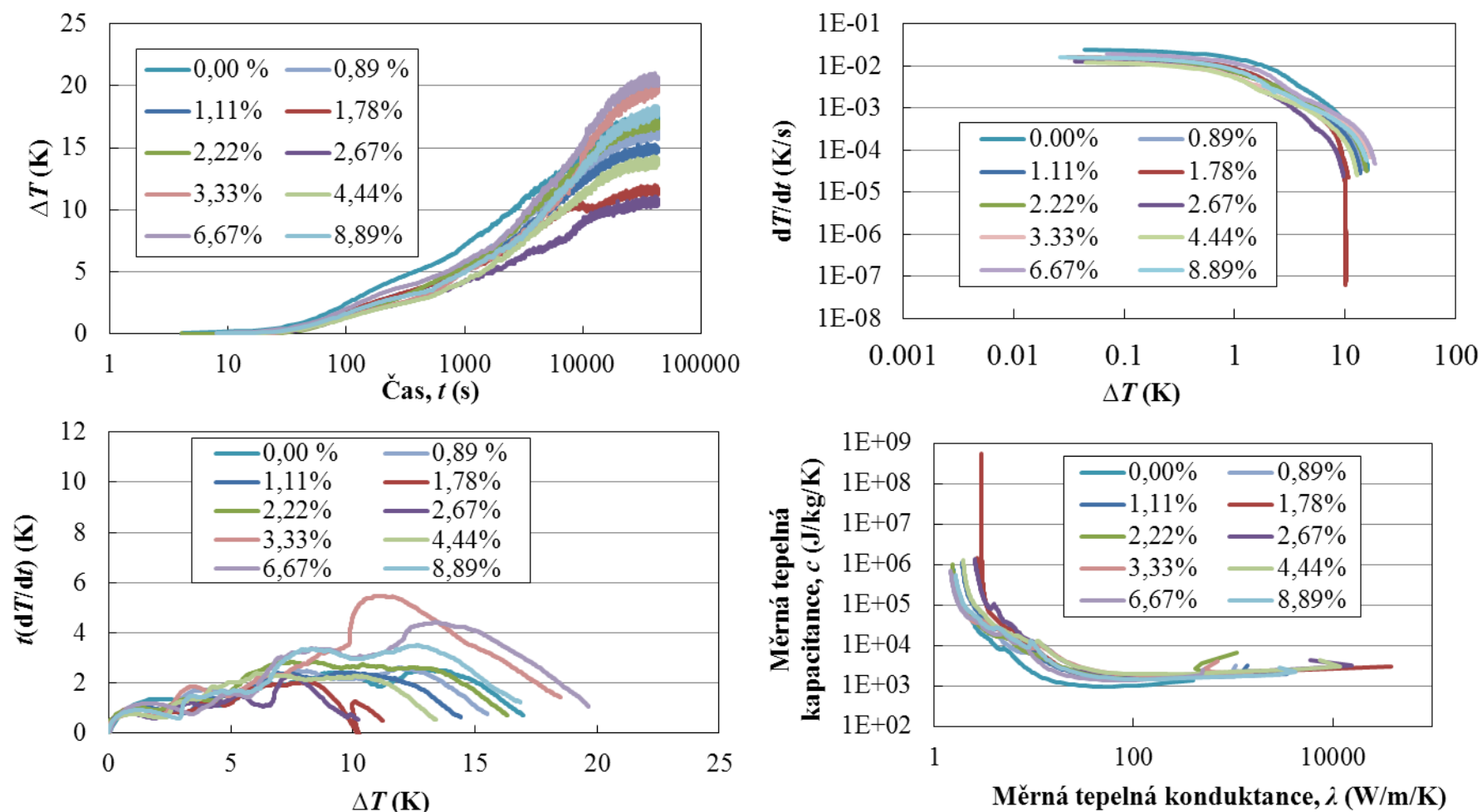
**Příloha 13: Tepelné vlastnosti druhé série vzorků s uhlíkovými sazemí**



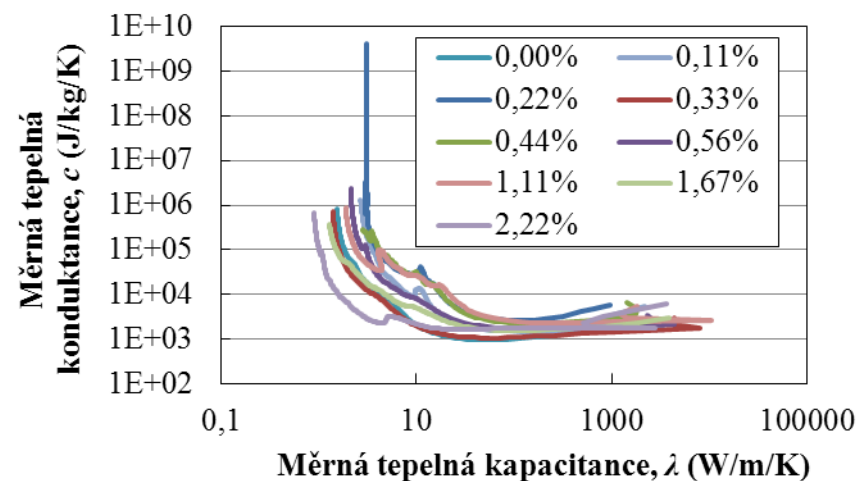
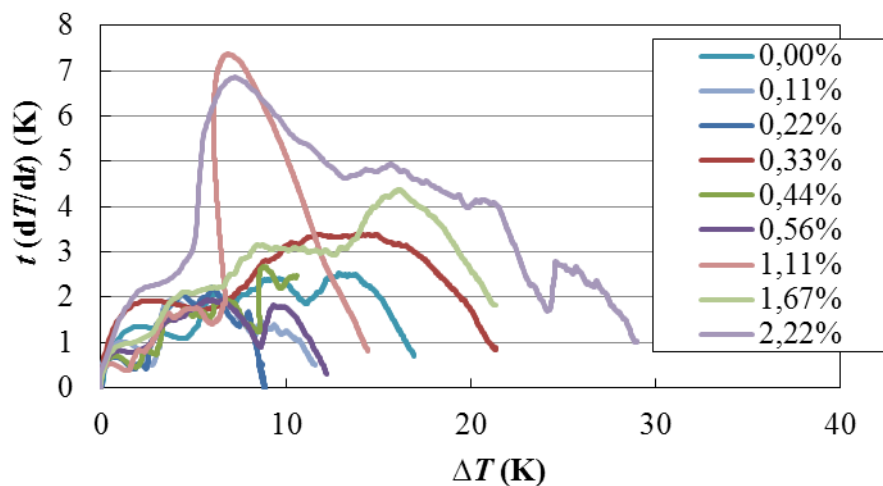
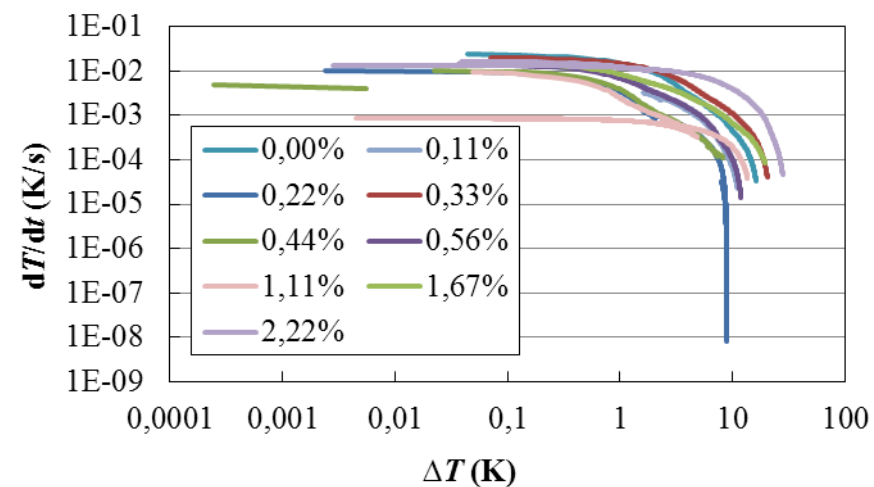
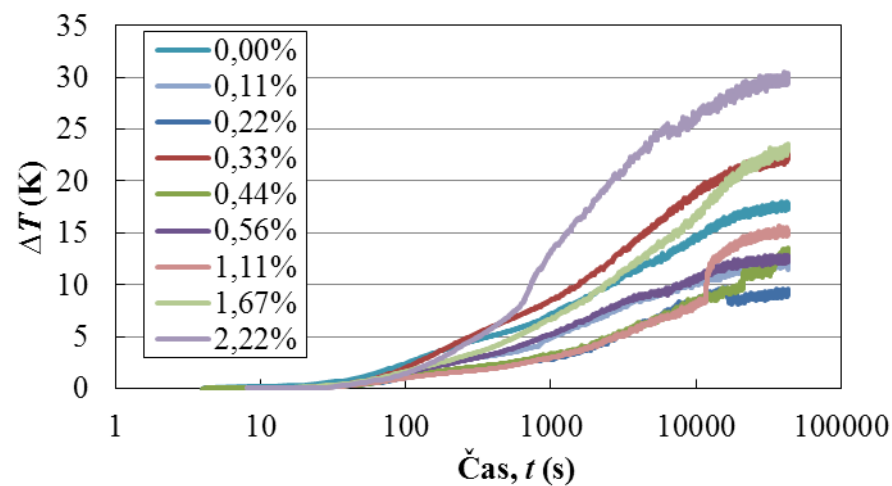
**Příloha 14: Tepelné vlastnosti první série vzorků s grafitovým práškem**



**Příloha 15: Tepelné vlastnosti druhé série vzorků s grafitovým práškem**



**Příloha 16: Tepelné vlastnosti druhé série a části první série vzorků s uhlíkovými vlákny**



**Příloha 17: Tepelné vlastnosti vzorků s uhlíkovými nanotrubičkami**

